

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ES-SCIENCES APPLIQUÉES

par

Joël FAVREL

Ingénieur I. N. S. A.

Licencié es-Sciences

Première Thèse

ETUDE DE L'INITIATION DES ETINCELLES DANS LE VIDE

Deuxième Thèse

PROPOSITION DONNÉE PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 22 Juillet 1968 devant la Commission d'Examen

MM. R. BERNARD

Président

E. PERNOUX

R. ARNAL

} Examineurs

EDITIONS DE L'A. G. E. L.

20 Rue François-Garcin - LYON (3^e)

1968



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552628_0009

THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ES-SCIENCES APPLIQUÉES

par

Joël FAVREL

Ingénieur I. N. S. A.

Licencié es-Sciences

Première Thèse

ETUDE DE L'INITIATION DES ETINCELLES DANS LE VIDE

Deuxième Thèse

PROPOSITION DONNÉE PAR LA FACULTÉ

Soutenues le 22 Juillet 1968 devant la Commission d'Examen

MM. R. BERNARD

Président

E. PERNOUX

R. ARNAL

}

Examineurs

EDITIONS DE L'A. G. E. L.

20 Rue François-Garcin - LYON (3^e)

1968

Doyens honoraires

MM. LONGCHAMBON, MOUSSA, GAUTHIER Henri.

Professeurs honoraires

MM. de LARAMBERGUE, SOLLAUD, MOUSSA, JAFFARD, EYRAUD Henri,
DEJARDIN, VIRET, AUMERAS.

Doyen

M. J. BRACONNIER

Assesseurs

MM. L. DAVID
J. BOIDIN

Professeurs

MM. H. LONGCHAMBON	Minéralogie
M. PRETTE	Chimie industrielle
C. COURTY	Chimie-Physique
R. KUHNER	Botanique
G. MALECOT	Mécanique rationnelle et appliquée
R. PARIS	Chimie minérale
J. JANIN	Physique générale
J. FLANDRIN	Géologie appliquée
R. BERNARD	Physique industrielle
V. NIGON	Zoologie expérimentale
H. GAUTHIER	Géologie
J. WAUTIER	Zoologie
J. CHOPIN	Chimie biologique
J. BRACONNIER	Calcul différentiel et intégral
J. CUEILLERON	Chimie
C. EYRAUD	Chimie minérale
A. SARAZIN	Physique nucléaire
J. BOIDIN	Microbiologie et Mycologie
G. PERES	Physiologie
G. MESNARD	Electronique
R. GRANDMONTAGNE	Physique
A. BOUTILLIER	Minéralogie
J. LAFOUCRIERE	Physique nucléaire théorique

MM. J. DREUX	Chimie organique
S. TEICHNER	Chimie industrielle
M. PAVANS de CECCATTY	Zoologie
J. C. MERLIN	Chimie analytique
M. DUFAY	Physique de l'Atmosphère
G. PHILBERT	Physique
R. COHEN-ADAD	Chimie
L. DAVID	Géologie
J. CHANEL	Psychophysiologie
G. MAURY	Méthodes Mathématiques de la Physique
J. DEPRAZ	Physique nucléaire
J. GAUTHIER	Chimie
F. GAUME	Physique
R. UZAN	Physique
J. M. LEGAY	Biologie animale
A. LAFROGUE	Physique
J. GERMAIN	Chimie
M. CHENEVOY	Pétrographie
J. BIGAY	Astronomie
Mme M. ERICSON	Physique

Professeur sans chaire

MM.	R. FERON	Mathématiques
	R. GINET	Zoologie
	G. ASCH	Physique
	P. MICHEL	Minéralogie
Mle	M. MAITROT	Physique
	P. GEVIN	Géologie
	D. PONASSE	Mathématiques
	J. D'INCAN	Physique C. S. U.
	P. LEFEBVRE	Mathématiques
	R. PERNET	Mathématiques
	R. CHERY	Physique
	R. BERGEON	Physique C. S. U.
Mle	D. GAUTHERON	Chimie biologique
	G. DESCOTES	Chimie organique
	A. ERBEIA	Physique
	Y. LEMOIGNE	Botanique
	L. MARTEL	Mécanique
	G. MICHEL	Biochimie
	P. PICARD	Mathématiques
	P. LEBRETON	Biologie végétale
	J. TOUSSET	Chimie
	E. COMBET	Mathématiques

Maîtres de Conférences

MM	G. DEMARCQ	Géologie
	J. DAVID	Biologie animale
	R. SCHMITT	Physique
	A. LAURENT	Chimie organique
	A. ROT	Mathématiques
	P. BETHOUX	Mathématiques
	M. GUSAKOW	Physique
Mle	G.G. THOMAS	Chimie minérale
	H. BUCHWALTER	Mathématiques C. S. U.
	J. BOUZON	Mathématiques C. S. U.
	J. COSNIER	Psychophysiologie
Mle	D. LAMOURE	Biologie végétale
	M. PORTHAULT	Chimie C. S. U.
	G. VALLET	Chimie macromoléculaire
	Y. HAUGAZEAU	Mathématiques
	R. ENAY	Géologie
	P. BERTHET	Biologie végétale
	J. BRUN	Biologie animale
	J. DELMAU	Physique
	E. EL BAZ	Physique-Electricité
	R. FONTANGES	Physiologie
	J. HUET	Chimie
	P. REMOND	Mathématiques C. S. U.
	R. JANIN	Mathématiques
	C. RUHLA	Physique
	C. DUPUY	Physique
	M. CHASTRETTE	Chimie
	J. PARIS	Chimie
	J. DAILLIE	Biologie animale
	J. P. LARPENT	Biologie végétale
Mle	M. J. WORBE	Physiologie
	A. HOLLEY	Psychophysiologie
	J. P. BURCQ	Physique
	A. ROUX	Biologie animale

Maître de Conférences adjoint

M	P. PIERRON	Chimie
---	------------	--------

Conseiller administratif

M	J. BURNET
---	-----------

Secrétaire principal honoraire

M	A. ROUX
---	---------

Personnel exerçant leurs fonctions à l' I. N. S. A. de LYON

Directeur : M. M. BONVALET

Professeurs

MM.	R. GELIN	Chimie organique
	R. ARNAL	Electronique
	M. PEYRON	Chimie-Physique
	L. EYRAUD	Electricité-Electrotechnique
	P. LAVIOLETTE	Biologie animale
	H. PACHECO	Chimie biologique
	E. PERNOUX	Optique
	M. ROLIN	Thermodynamique chimique
		Physique de la matière

Professeurs sans chaire

MM.	R. GOUTTE	Electricité-Electrotechnique
	J. BOUSQUET	Chimie minérale
	C. GUILLAUD	Electricité-Electrotechnique

Maîtres de Conférences

MM.	M. CHEVRETON	Chimie
	B. CLAUDEL	Chimie
	L. CRONENBERGER	Chimie biologique
	C. DUC-MAUGE	Chimie
	P. GOBIN	Métallurgie
	M. GODET	Mécanique
	J. GOLE	Chimie macromoléculaire
	C. GUITTARD	Physique
	J. JOUBERT	Mécanique

Maîtres de Conférences (suite)

MM.	J. LAFON	Mathématiques
	M. LALANNE	Mathématiques
	B. LESPINASSE	Génie chimique
	G. MONNIER	Chimie des Métaux
	J. L. PETIT	Electrotechnique
	P. PINARD	Physique de la matière
	M. RICHARD	Electricité - Electrotechnique
	R. RIVIERE	Cristallographie
	J. ROBIN	Chimie industrielle
	F. SALLES	Mécanique
	L. SICARD	Mécanique
	F. STOEBER	Microbiologie

Personnels exerçant leurs fonctions aux I. U. T. de LYON et de
SAINT-ETIENNE

I. U. T. - LYON : Directeur : M. L. FEUVRAIS

Professeur

M L. FEUVRAIS Physique

Maîtres de Conférences

MM B. POUYET Photochimie

A. VILLE Biologie appliquée

Maître de Conférences associé

I. U. T. - SAINT-ETIENNE : Directeur : M. J. C. MERLIN

Maître de Conférences

M M. DAILLER Physique

A. COTTON Physique

Personnels exerçant leurs fonctions à l'Ecole Centrale Lyonnaise

Professeur sans chaire

M J. MATHIEU Mécanique des Fluides

Maître de Conférences

Mle G. COMTE-BELLOT Mécanique des Fluides

Maître de Conférences associé

M A. MOIROUX Mécanique appliquée

Ce travail a été effectué dans le laboratoire d'Electronique du Département de Physique de l'Institut National des Sciences Appliquées de LYON.

Je remercie très vivement Monsieur le Professeur R. BERNARD, Directeur de ce Département, d'avoir bien voulu présider la Commission d'Examen.

Je remercie également Monsieur le Professeur E. PERNOUX qui a bien voulu examiner mon travail et faire partie de la Commission d'Examen.

Je suis heureux de pouvoir exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur R. ARNAL, qui m'a donné l'idée de ce travail et qui m'a conseillé tout au long de sa réalisation.

Que toute l'équipe du laboratoire, et particulièrement Pierre BOUVIER, trouve ici l'expression de ma reconnaissance .

INTRODUCTION

Pour ses nombreuses applications, l'étude de l'isolement électrique créé par un vide industriel (10^{-5} à 10^{-6} Torr) entre deux électrodes métalliques prend de plus en plus d'importance.

Dans la plupart des cas, les défauts de l'isolement du vide perturbent le bon fonctionnement des appareils qui utilisent le vide comme isolant : microscopes électroniques, accélérateurs de particules, application aux télécommunications... La limite des performances de ces appareils est liée à la limite de la tenue en tension du vide.

Dans d'autres cas, ces mêmes défauts sont utilisés comme source de rayons X ou ultraviolets pour la radiographie instantanée par exemple.

Dans l'ordre d'importance croissante du courant transporté lors de la conduction électrique entre les électrodes on distingue les courants de prédécharges, les étincelles, les arcs.

Sans vouloir essayer de réduire ces défauts ou de les maîtriser pour mieux les utiliser nous nous sommes attachés à étudier l'initialisation des étincelles. Ceci nous a amené à explorer d'une façon systématique le temps précédant juste l'étincelle. Pour ce faire nous présentons un travail en trois parties :

- Dans la première partie, après avoir exposé les différentes théories à propos des étincelles, nous décrivons les conditions expérimentales dans lesquelles cette étude a été faite.

- Dans la deuxième partie nous décrivons un appareillage propre à observer de façon analogique le temps précédant juste l'étincelle et nous exposons les résultats obtenus à l'aide de cet appareillage.

- La troisième partie est consacrée au traitement en temps réel des données statistiques relatives au temps précédant l'étincelle en présence de microdécharges par ordinateur. Les résultats obtenus nous ont permis de faire une étude comparative sur les microdécharges précédant une étincelle et sur l'étincelle elle-même.

PREMIERE PARTIE

LA FORMATION DES ETINCELLES DANS LE VIDE

I - Caractéristiques des différentes décharges dans le vide.

Lorsqu'on augmente la différence de potentiel entre deux électrodes métalliques, planes et parallèles dans le vide industriel (10^{-5} à 10^{-6} Torr) trois phénomènes bien distincts peuvent apparaître :

1).. Un phénomène appelé phénomène de prédécharge. Il est caractérisé soit par un courant continu lorsque la distance interélectrode est faible (4), (5), soit par un courant sous forme d'impulsion appelées microdécharges lorsque la distance qui sépare les électrodes est supérieure à 1 mm. Ces dernières ont été décrites par R. ARNAL (1). Dans les conditions expérimentales où il a travaillé, il a caractérisé ces microdécharges par :

- une quantité d'électricité transportée pouvant aller jusqu'à un micro-coulomb
- une durée de quelques dizaines de microsecondes à quelques dizaines de millisecondes.

2).. Pour une tension plus élevée, lorsque la résistance de protection de la haute tension est grande, un régime dit d'étincelles se superpose au régime de microdécharges. Une étincelle est un accroissement brusque de courant simultané à la chute de potentiel entre les électrodes à quelques volts. Ce courant est de courte durée.

3).. Lorsque la source de haute tension peut fournir une puissance suffisante, et si la résistance de protection est faible, l'étincelle peut se transformer en arc électrique et rester stable dans le temps (6). M. et A. GOLDMAN ont donné une explication du phénomène en observant optiquement l'espace interélectrode. (6).

II - Rappels des différentes théories sur les étincelles.

Les hypothèses les plus courantes avancées sur l'initiation ou le développement des étincelles font appel aux deux phénomènes suivants :

- arrachement de microparticules
- émission électronique

1°) Arrachement de microparticules

Les microparticules ou "clumps" sont des agrégats métalli-

ques chargés d'électricité, arrachés d'une électrode. CRANBERG (7) le premier a émis l'hypothèse qu'une étincelle pouvait se développer à partir d'une microparticule. Dans cette hypothèse la particule est arrachée d'une des deux électrodes et est accélérée vers l'autre par le champ électrique (3). Si l'énergie qu'elle transporte est assez grande lors de son impact, il y a une élévation locale de température suffisante pour produire une vapeur métallique à l'intérieur de laquelle une décharge gazeuse prend naissance.

Dans ce cas, si on considère que la charge Q prise par la particule est proportionnelle au champ inter-électrode E , son énergie cinétique devient dans le cas d'électrodes planes parallèles :

$$W = Q E = K V^2/d$$

où d est la distance entre les électrodes et K un facteur de proportionnalité.

L'hypothèse de CRANBERG conduit à trouver un seuil de tension pour l'apparition des étincelles de la forme :

$$V \geq K^{-1/2} \cdot d^{1/2}$$

Ainsi la courbe $\log V = f(\log d)$ est une droite de pente 0,5.

SLIVKOV (8) a trouvé expérimentalement une droite de pente 0,625 pour des distances interélectrodes allant jusqu'à 8 mm.

A partir de ses résultats expérimentaux, il reprend l'hypothèse de CRANBERG en faisant intervenir la taille des particules et explique théoriquement la valeur de 0,625.

2°) Emission électronique

Sous l'effet d'un champ électrique on peut envisager l'émission d'électrons soit à partir de micropointes préexistant ou croissant sur la cathode, soit à partir de défauts de surface qui entraîneraient une variation de la barrière de potentiel. L'émission des électrons peut être favorisée de deux manières différentes :

- émission thermoélectronique suivant l'effet SCHOTTKY
- émission froide ou émission de champ suivant la loi de Fowler-Nordheim.

L'hypothèse la plus couramment admise dans cet ordre d'idée est l'émission des électrons par effet tunnel suivant la loi de Fowler-Nordheim, en supposant l'existence de micropointes au voisinage desquelles le champ est beaucoup plus important que le champ macroscopique (9). Suivant les conditions expérimentales, ce courant chauffe la pointe émissive par effet Joule ou une région de l'anode en regard par bombardement :

- Chauffage de la cathode.

DIKE et AL (10) ont pu mettre en évidence que le métal de l'anode ne jouait aucun rôle dans l'apparition des étincelles lorsque la cathode était en forme de pointe de tungstène (rayon de courbure inférieur à 1 micron). Dans ce cas, le renforcement de champ à la cathode peut conduire à des densités de courant émis par effet tunnel jusqu'à 10^8 A/cm². Ces auteurs émettent alors l'hypothèse suivante : les pointes émissives de la cathode fondent par effet joule sous l'influence du courant qui les traverse et la vapeur métallique qui en résulte initie une étincelle.

- Chauffage de l'anode par bombardement électronique.

Dans cette hypothèse la densité de courant transporté par les électrons peut chauffer localement l'anode jusqu'à évaporation. Cette théorie a surtout été développée par MAITLAND (11) : une micropointe de la cathode émet des électrons ; ceux-ci sont attirés vers l'anode en se dispersant légèrement et chauffent une surface bien déterminée de l'anode. Si la densité de puissance atteignant l'anode est suffisante, une étincelle est initiée. L'examen de la surface de l'anode après qu'une étincelle ait eu lieu, montre qu'autour d'une marque centrale il existe une multitude de petits cratères (10^5 environ). MAITLAND en a déduit que chaque cratère est creusé par une micropointe émissive unique et qu'une étincelle prend naissance à l'un quelconque de ces cratères pourvu que l'énergie qui s'y accumule dépasse un certain seuil.

En outre, certains auteurs (12) (13) envisagent de concilier les deux grandes tendances développées ci-dessus. BRODIE (12) envisage une émission d'électrons par une micropointe ; ces électrons chauffent la micropointe et quand sa température est suffisante, la tension de rupture devient assez faible pour qu'elle se détache de la cathode pour être accélérée vers l'anode où elle se sublime.

HAWLEY (14) a mis en évidence une singularité dans la variation du seuil de la tension de claquage en fonction de la distance interélectrode. Il apparaît que les étincelles seraient initiées par émission électronique pour les faibles distances (inférieures à 1 ou 2 mm) entre les électrodes. Au contraire, elles seraient plutôt initiées par l'arrachement des microparticules pour des distances plus grandes.

Il apparaît ainsi que les théories ne manquent pas pour expliquer la formation des étincelles, mais chacune d'entre elles n'explique en fait, que certains résultats expérimentaux. De plus les conditions expérimentales influencent directement les résultats obtenus par chacun.

Le but de ce travail est d'obtenir des résultats expérimentaux pour essayer de connaître le mécanisme d'initiation : soit observation des formes d'ondes avant une étincelle, soit étude statistique des instants où elles surviennent par rapport aux microdécharges.

III - Conditions expérimentales pour l'obtention des étincelles.

Les résultats obtenus sur l'initiation ou le développement des étincelles, sont liés à de multiples paramètres : distance entre les électrodes, géométrie des électrodes (rayon de courbure, surface en regard), nature du métal des électrodes, préparation et conditionnement des surfaces, température, pression du gaz résiduel... (15 à 25). La variation du seuil de la tension d'apparition des étincelles en fonction de ces paramètres a fait l'objet de nombreux travaux, c'est pourquoi il est nécessaire de bien exposer les conditions expérimentales dans lesquelles nous avons travaillé.

Dans l'expérience qui suit, tous nos travaux ont été effectués dans les mêmes conditions expérimentales, sauf dans des cas exceptionnels qui sont indiqués au moment voulu.

Nous avons utilisé des électrodes planes en cuivre commercial, de section circulaire (diamètre : 4 cm) ; ces électrodes étaient placées dans le vide à une distance de 2,5 à 3 mm. Les électrodes ont toujours été polies de façon mécanique et ensuite nettoyées à l'eau. Le vide était obtenu par un système de pompage à deux étages : pompe à palette, pompe

a diffusion d'huile. La pression résiduelle dans l'enceinte à vide variait entre 5.10^{-5} et 2.10^{-6} Torr. Le circuit électrique pour faire varier la tension entre les électrodes comprend :

- une alimentation haute tension négative variable de 0 à 80 000 volts pouvant débiter 200 microampères et filtrée en sortie par un réseau résistance (100 mégohms) capacité (4500 picofarads).
- entre le réseau de filtrage et la cathode nous avons intercalé une résistance de protection de 3 mégohms.

Dans ces conditions nous avons toujours obtenu un régime de microdécharges simultanées à l'apparition des étincelles.

DEUXIEME PARTIE

OBSERVATION DE L'EVOLUTION DU COURANT INTERELECTRODE

PENDANT LE TEMPS PRECEDANT UNE ETINCELLE

I - Etude préliminaire

Pour observer l'évolution d'un courant éventuel précédant une étincelle nous avons été amené à réaliser un appareillage électronique. Afin de fixer ses caractéristiques il était utile de connaître la forme, la durée et l'amplitude du courant transporté par une étincelle. D'après des observations optiques (26) par lesquelles la mesure de la durée du phénomène lumineux accompagnant une étincelle était de 24 à 93 nanosecondes pour une distance de 0,9 mm (électrodes en cuivre), on pouvait admettre que le courant de l'étincelle varie très rapidement au cours du temps. D'autre part, l'énergie mise en jeu est grande : c'est celle de la décharge d'un condensateur (l'espace interélectrode plus la capacité parasite parallèle) chargé initialement à la valeur de la haute tension. Ces deux points : durée brève, énergie grande, montrent que la puissance instantanée est si importante qu'elle nécessite l'éloignement de tout appareil de mesure sensible pour échapper au rayonnement et de faire la mesure du courant à travers des atténuateurs à grande bande passante. La transmission des signaux entre l'enceinte contenant les électrodes et les appareils de mesure doit se faire par câble coaxial adapté par son impédance caractéristique pour éviter le rayonnement et ne pas déformer le signal électrique. Nous avons utilisé un câble coaxial de 50 ohms d'impédance caractéristique pour pouvoir l'adapter sur des atténuateurs "Tektronix" ou "Général Radio". Nous observons à l'oscilloscope le signal transitoire correspondant à l'étincelle. Nous avons pris des photographies des formes d'onde, dans les conditions expérimentales décrites précédemment. Les caractéristiques du courant lié à l'étincelle sont les suivantes :

- une amplitude de 5 à 15 Ampères
- un temps de montée d'environ 50 nanosecondes
- un temps de descente d'environ 50 nanosecondes.

La quantité d'électricité libérée au cours d'une étincelle varie entre 0,5 et 1 microcoulomb. Des auteurs (6) ont expliqué qu'une étincelle était comparable à l'amorçage d'un arc et que celui-ci pouvait s'entretenir si l'impédance interne de la haute tension était assez faible pour alimenter le courant de maintien de l'arc. Le schéma électrique correspondant aux mécanismes de décharges dans le vide est celui de la figure 1 où Cd est un condensateur jouant le rôle de capacité réservoir et R une résistance de protection.

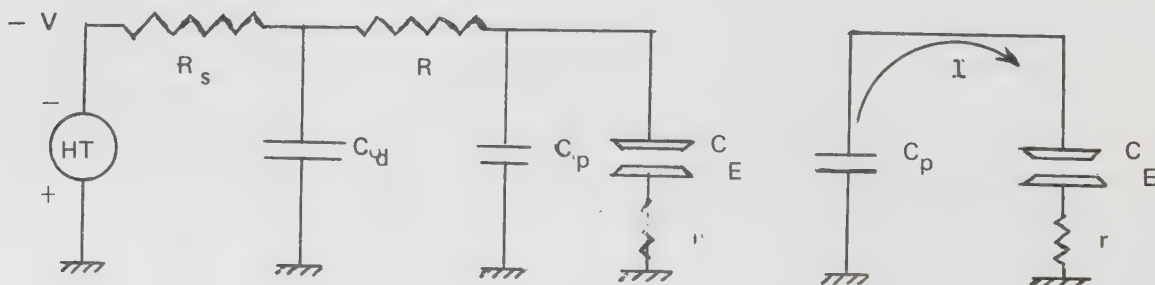
La capacité C_p est la capacité qui existe entre l'électrode portée à la haute tension et la masse.

Lors du développement d'une étincelle ce schéma peut être simplifié pour donner celui de la figure 2. En effet, le courant fourni par la résistance de protection R est négligeable devant celui développé par l'étincelle.

Ainsi, pratiquement, le courant de l'étincelle est fourni par la capacité parasite C_p qui se décharge à travers l'espace interélectrode. La mesure de ce courant se fait par la mesure de la différence de potentiel aux bornes d'une résistance faible $r = 50$ ohms afin de ne pas perturber la forme de ce courant. La charge électrique maximum transportée pendant une étincelle est $Q_M = C_p V$, et ceci est obtenu quand la tension entre les électrodes devient nulle (pratiquement elle tombe à quelques volts).

Un calcul simple donne pour la capacité C_E la valeur de 4 picofarads avec les électrodes utilisées, et une mesure de C_p donne approximativement 10 à 12 picofarads. Pour une tension interélectrode de 50 000 volts, la charge prise par C_p est de 0,5 à 0,6 microcoulombs et la charge transportée par les étincelles à cette tension ne dépasse jamais ces valeurs. Au cours du développement d'une étincelle il y a échange de charges électriques entre les électrodes ce qui contribue à décharger la capacité C_E ; la capacité C_p crée un courant qui est mesuré au travers de r : c'est ce courant qu'on appelle courant d'étincelle.

Il est à remarquer que l'amplitude du courant part de zéro, du moins à l'échelle où il est observé, et croît avec une dérivée temporelle discontinue à l'origine (voir figure 7). Quant à la puissance instantanée émise pendant une étincelle, elle peut être approchée par une impulsion de valeur crête 10^5 watts et de durée 100 nanosecondes environ.



II - Principe de la mesure (Observation)

Pour observer une variation éventuelle du courant à travers l'espace interélectrode, avant une étincelle, il faut mettre en mémoire de façon permanente le signal issu du point de mesure, éventuellement amplifié. Lorsque l'étincelle survient, il faut pouvoir observer à l'oscilloscope le contenu de cette mémoire de façon à restituer la forme du signal avant une étincelle, du moins pendant un intervalle de temps T que l'on définira.

Pour cela nous avons réalisé un appareillage que nous avons publié dans ses grandes lignes (27). Le bloc diagramme (voir figure 3) permet d'en expliquer le fonctionnement.

Le signal est d'abord écrêté pour ne pas détériorer l'appareillage électronique situé après et est amplifié ou non suivant les cas. Ensuite, il traverse une ligne à retard, de retard T , pour être enfin observé à l'oscilloscope.

D'autre part, une impulsion est créée lorsqu'une étincelle survient et sert à synchroniser l'oscilloscope. Ainsi; à l'instant où une étincelle se développe, le balayage de l'oscilloscope est déclenché : ceci permet de voir ce qui sort de la ligne à retard (T), c'est-à-dire toute l'information contenue dans l'intervalle de temps T précédant juste l'apparition de l'étincelle. La ligne à retard joue le rôle de mémoire analogique et l'intervalle de temps d'observation peut varier de 500 nanosecondes à 1,5 millisecondes, suivant les cas.

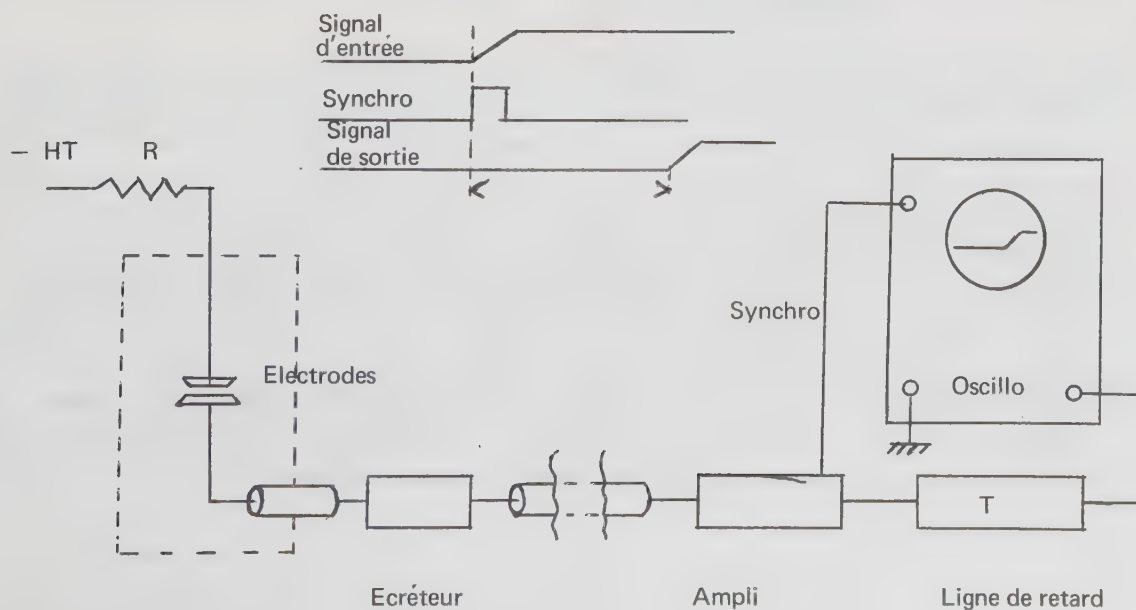


Fig. 3

III - Appareillage

1) Contraintes imposées par le phénomène étincelle et l'électronique.

Dans toute cette étude, l'observation du temps précédant l'étincelle est surtout orientée vers la recherche d'une éventuelle variation du courant plutôt que vers la mesure de courants d'amplitude infime (inférieur à 0,1 microampères).

Cette observation devrait pouvoir se faire sur des courants d'amplitude aussi faible que possible malgré tout, aussi bien que sur des courants variant rapidement. Ainsi l'appareillage électronique doit avoir des caractéristiques aussi poussées que possible, tant en bande passante qu'en possibilité de détection. Cependant ces caractéristiques sont liées à la durée de l'observation précédant l'étincelle. En effet, si T est la durée de cette observation, on devra prendre au minimum T comme durée de balayage de l'oscilloscope pour ne rien perdre en information. Or une impulsion isolée de durée τ ne peut être discernée sur l'écran de l'oscilloscope que si τ est supérieur à T/k , k étant de l'ordre de 10 à 20 pour les oscilloscopes rapides. Ainsi on pourra se permettre de diminuer la bande passante de l'ensemble lorsqu'on augmentera le temps d'observation T . Parallèlement, la bande passante diminuant, on pourra augmenter la sensibilité de l'ensemble, de sorte que la quantité de courant observable variera peu en fonction du temps d'observation.

2) Eléments écrêteurs.

Pour des raisons que nous verrons par la suite, nous avons choisi l'impédance d'entrée de l'amplificateur égale à 50 ohms en régime linéaire. Ainsi le courant d'une étincelle entraînerait une tension à l'entrée de l'ordre de 500 à 1000 volts, tension qui peut détruire soit l'amplificateur, soit l'oscilloscope suivant les cas. Pour l'éviter on interpose un élément non linéaire qui ne perturbe pas le signal si son amplitude ne dépasse pas un certain seuil et qui absorbe le courant excédentaire dans le cas contraire. Une diode rapide au silicium telle que "SG 5100" est satisfaisante. Pour des tensions jusqu'à 700 millivolts (c'est-à-dire 14 milliampères dans 50 ohms), la diode peut être représentée par une résistance très grande (supérieure à 10 kilo ohms dans toute cette gamme de tension) et une capacité

en parallèle faible (environ 10 picofarads). Pour un courant d'entrée plus important (supérieur à 14 milliampères), la diode garde une tension sensiblement constante à ses bornes, si ce courant ne dépasse pas 500 milliampères à 1 ampère. Au-dessus elle a un comportement selfique et la tension à ses bornes peut atteindre 5 à 10 V pour un courant de 10 à 20 ampères (28), mais ceci n'est pas dangereux pour le montage qui suit. En outre, l'étage d'amplification joue un rôle d'écrêtage de par la limitation d'amplitude de la tension à la sortie et ceci a aussi un rôle important pour l'attaque des lignes à retard.

3) Différentes lignes à retard.

Pour des retards courts, les lignes coaxiales conviennent le mieux. Elles ont une impédance caractéristiques bien définie, de faibles pertes, ne rayonnent pas d'énergie et par conséquent ne captent pas d'énergie sous forme de rayonnement. L'impédance caractéristique de ces lignes la plus courante est de 50 ohms et nous avons utilisé ces lignes non seulement pour réaliser des retards mais aussi comme liaison entre les électrodes du montage expérimental et l'amplificateur. C'est ce qui a déterminé l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie de l'amplificateur.

Nous avons utilisé du câble RG 8B-U pour réaliser un retard de 500 nanosecondes.

Pour obtenir des retards plus grands, les lignes coaxiales ne conviennent plus pour deux raisons principales :

- la première est une raison d'encombrement et de prix ; en effet, il faut déjà 100 mètres de câble pour obtenir un retard de 500 nanosecondes.

- la seconde, qui est plus importante au point de vue mesure, est la variation du temps de montée de la ligne avec sa longueur. On peut montrer (29) que le temps de montée d'une ligne coaxiale varie proportionnellement au carré de sa longueur.

Ainsi, si on se fixe comme facteur de performance d'une ligne à retard le rapport :

$$k = \frac{\text{temps de retard}}{\text{temps de montée à la sortie (10 à 90 \% de l'amplitude)}}$$

et si on se borne à utiliser des lignes à retard ayant un facteur k supérieur à 10, la ligne coaxiale ne convient plus dès que sa longueur dépasse 120 mètres (pour le RG 8B-U), c'est-à-dire dès que l'on veut un retard supérieur à 600 nanosecondes.

Pour ces deux raisons nous avons réalisé et utilisé des lignes à constantes localisées pour des retards de 5 500 microsecondes et de une milliseconde ayant les caractéristiques suivantes :

- impédance caractéristique $Z_c = 50$ ohms
- facteur $k \gg 10$

Ces lignes sont constituées de cellules passe-bas en π montées en cascade ; le nombre de cellules nécessaires pour avoir $k \gg 10$ est de l'ordre de 40 et le calcul des éléments de la cellule se fait en fonction de l'impédance caractéristique Z_c et du retard par cellule (30).

Si les lignes à constantes localisées présentent des avantages par rapport aux lignes coaxiales pour des retards longs, elles ont cependant un inconvénient supplémentaire. Lorsqu'on cherche à détecter à travers une ligne à retard un signal de très faible amplitude par rapport à l'amplitude d'un autre signal qui lui succède, il ne faut pas que ce dernier perturbe la sortie de la ligne à retard lorsqu'il apparaît à l'entrée. Dans le cas d'une ligne coaxiale, ceci n'arrive jamais car le retard est fixé par la vitesse de propagation de l'onde, c'est-à-dire la vitesse de la lumière, dans la ligne. Dans le cas d'une ligne à constante localisée la vitesse de l'onde dans le milieu environnant est la vitesse de la lumière alors que le front de l'impulsion avance avec une vitesse très faible. Ceci est équivalent à un couplage entre l'entrée et la sortie de la ligne à retard et si on veut pouvoir détecter des signaux de faible amplitude précédant une étincelle, il faut que le signal correspondant à celle-ci soit d'amplitude à peine plus élevée que l'amplitude des signaux à observer.

Afin d'observer la variation du courant précédant l'étincelle

à bas niveau, nous avons déjà vu la nécessité d'un amplificateur mais il faut encore que cet amplificateur ait un gain suffisant ; sa tension de sortie lorsqu'il est saturé est toujours la même et on veut garder un rapport relativement faible entre cette tension et la tension des signaux éventuels à observer.

4) Etude d'un amplificateur.

En raison des contraintes imposées par les lignes à retard, l'amplificateur devait répondre aux conditions suivantes :

- impédance d'entrée = 50 ohms
- charge en sortie = 50 ohms
- grand gain, faible bruit
- bande passante pouvant aller du continu jusqu'à 30 MHz

Il nous a semblé, après plusieurs essais, que cet amplificateur devait être une succession de modules montés en cascade. Chaque module est un amplificateur à entrée différentielle en raison de sa meilleure stabilité en température. D'autre part, pour augmenter la bande passante, il est utile de contre-réactionner l'amplificateur soit par une contre-réaction globale, soit par des contre-réactions partielles sur chaque module. Si la première méthode est la plus séduisante au point de vue stabilité en température, par contre en prenant le point de vue de la réalisation pratique, elle tend à faire osciller l'amplificateur pour un même produit gain-bande passante. Ainsi nous avons choisi de mettre en cascade trois modules identiques, chacun ayant un gain de 10 en tension.

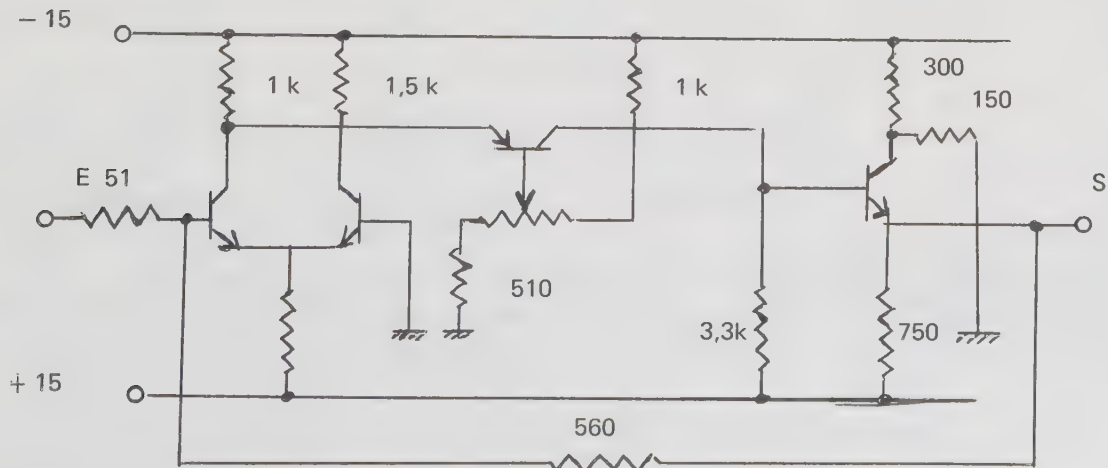


Fig. 4 Module d'amplification résistances en ohms

L'étage d'entrée se compose de deux transistors montés en différentiel, mais un des deux transistors attaque un transistor monté en base commune de façon à conserver une grande bande passante. L'étage différentiel a aussi l'avantage d'être moins sensible au rayonnement qu'un autre mode d'amplification. L'impédance de sortie en boucle ouverte est diminuée en ajoutant un transistor monté en collecteur commun.

Le calcul théorique du gain en boucle ouverte de ce module donne la valeur 330 en ne tenant pas compte des résistances de base des transistors d'entrée. En fait ces transistors étant polarisés à fort courant pour conserver un produit gain-bande passante maximum les résistances de base interviennent et le gain mesuré est de l'ordre de 200 à 250 suivant les transistors d'entrée. Ainsi, en ramenant le gain de ce module à 10, on obtient un taux de contre-réaction de l'ordre de 20, ce qui rend les caractéristiques, impédance d'entrée et gain, indépendantes des transistors utilisés. Par contre, la bande passante dépend de ceux-ci et avec les transistors utilisés nous avons obtenu un temps de montée variant entre 3 et 4 nanosecondes.

L'amplificateur proprement dit est composé de trois modules analogues à celui décrit ci-dessus. Une modification de bouclage est cependant nécessaire pour le premier étage : on peut considérer les impulsions électriques (microdécharges, étincelles) comme étant produites par un générateur de courant ; on les transforme en générateur de tension,

De plus, si on veut une meilleure stabilité en température, on peut diminuer le gain pour la composante continue par une contre réaction globale et sélective. Ceci donne pour schéma global :

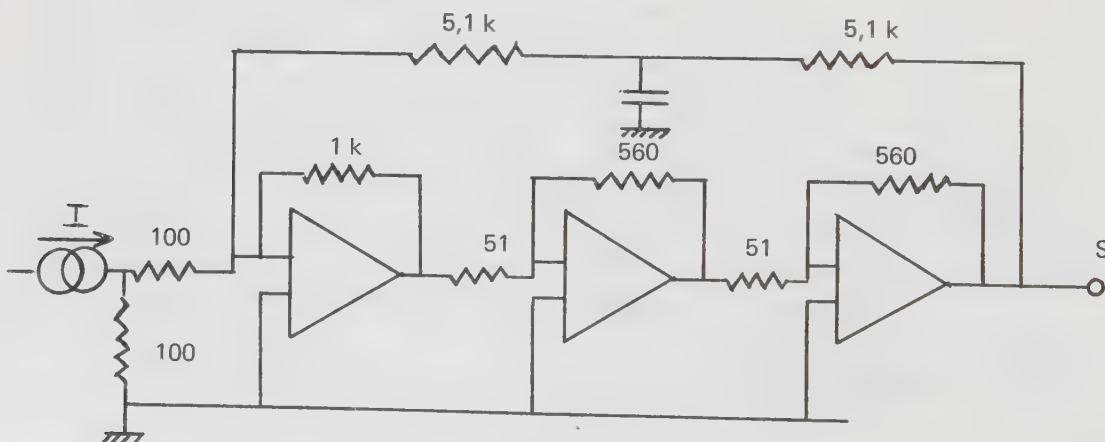


Fig. 5 Amplificateur

On a ainsi ramené le gain en continu à 100 alors que le gain en impulsion est de 1000.

En outre, on adjoint à l'amplificateur un détecteur de seuil variable (de 1 à 20 mA de courant d'entrée) sur le premier étage et une mise en forme pour pouvoir reconnaître les étincelles. La sortie de ce détecteur attaque le déclenchement extérieur du balayage de l'oscilloscope et sert de référence des temps.

Performances globales :

En fonction des différents retards T utilisés, les performances de l'ensemble sont résumées dans le tableau ci-dessous :

T	Temps de montée	Courant minimum détectable quand l'amplificateur est stabilisé.
100 ns	4 ns (Ampli)	2 μ A
500 ns	40 ns	2 μ A
5 μ s	500 ns	1 μ A
500 μ s	50 μ s	0,2 μ A
1,5 s	100 μ s	0,1 μ A

De plus, l'amplificateur est saturé à la sortie pour un courant d'entrée de 20 microampères.

IV-Observation directe du temps précédant l'étincelle

1 - Conditions expérimentales.

On peut observer la variation d'un éventuel courant avant une étincelle en se servant du principe décrit ci-dessus, sans amplifier le signal. Le montage expérimental devient celui de la figure 6.

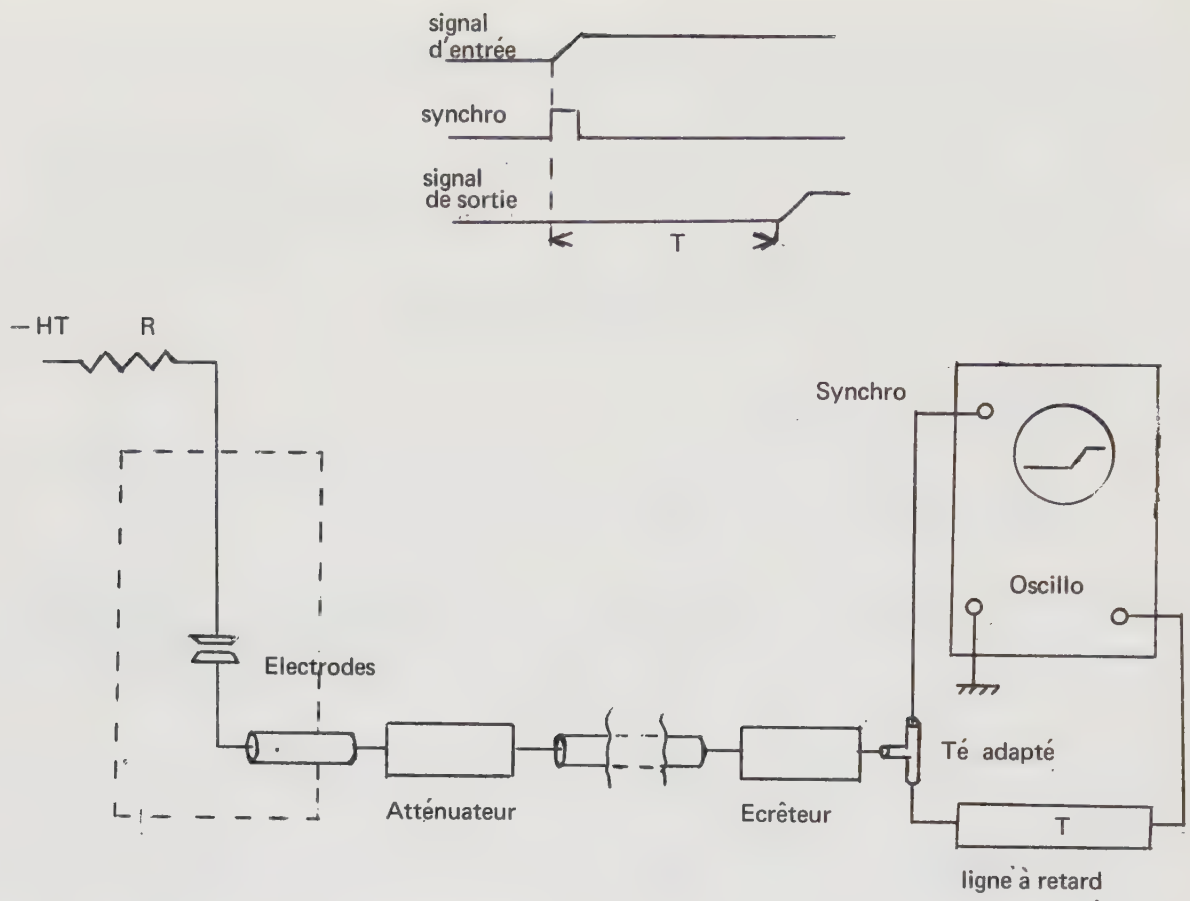


Fig. 6

Avant d'écarter on peut envisager la possibilité d'atténuer le signal dans un rapport α : l'écarter étant linéaire seulement dans la partie 0-14 milliampères, avant l'atténuateur le domaine de linéarité devient 0 - 14 x α milliampères (par exemple, si α = 100, la partie linéaire du signal observé à l'oscilloscope est 0 - 1,4 ampères).

Après l'écarter, un Té de puissance adapté à 50 ohms sur toutes ses branches permet d'avoir simultanément une impulsion pour déclencher le balayage à l'oscilloscope et le signal non déformé pour attaquer la ligne à retard de retard T.

A cause du rayonnement émis par le développement de l'étincelle, il faut être prudent sur la forme du signal vu sur l'oscilloscope. La puissance rayonnée par un signal sinusoïdal est d'autant mieux captée que la fréquence du signal est grande, à cause des dimensions relativement faibles des appareils utilisés. Compte-tenu de la durée de l'étincelle et de la bande passante de l'oscilloscope il y a un risque de capter un rayonnement assez important dans la bande 10 à 30 MHz. L'action du rayonnement se répercute pendant un temps égal à une dizaine de fois la durée de l'étincelle. Ceci rendra difficile l'observation du temps précédant l'étincelle, surtout lorsqu'on utilisera une ligne à retard de 500 ns : pendant tout ce temps on pourra craindre l'apparition de forme d'onde parasite. Pour éviter cet inconvénient on peut placer les appareils de mesure à grande distance de l'enceinte et éventuellement diminuer la bande passante de l'oscilloscope.

Toutes les mesures faites directement à l'oscilloscope ne permettent pas de mesurer des variations de courant inférieures à 0,2 milliampères.

2 - Résultats photographiques.

Les photographies ont été prises en faisant varier les paramètres suivants :

- paramètres expérimentaux :

- distance interélectrode 2,5 millimètres
- tension appliquée ... de 35 à 80 kilovolts
- résistance de protection R... 3 megohms

- paramètres de la mesure du courant :

- sensibilité en courant ... de 0,8 milliampères à 1 ampère par centimètre de l'oscilloscope.
- balayage ... de 40 nanosecondes à 200 microsecondes par centimètre et ceci pour des retards variant de 100 nanosecondes à 1 milliseconde.

Toutes les photos prises (fig. 8) font apparaître :

- d'une part, l'absence de variation de courant supérieur à 400 microampère pendant un intervalle de temps allant jusqu'à 1 milliseconde juste avant l'étincelle. Pour des intervalles de temps allant de 100 à 500 nanosecondes avant l'apparition de l'étincelle, il a été mis en évidence que les variations périodiques du signal photographié, sont dues au rayonnement de l'enceinte : leurs amplitudes ne varient pas linéairement avec le gain de l'oscilloscope et un balayage déclenché par une étincelle sans que le signal correspondant ne soit présent à l'entrée de l'oscilloscope, fait ressortir ces oscillations. Dans ce cas nous pouvons au moins dire qu'il n'y a pas de variation de courant d'amplitude supérieur à celle des oscillations, c'est-à-dire 1 milliampère

- d'autre part, et ceci est la conséquence de ce qui vient d'être indiqué, la croissance très rapide du courant de l'étincelle, au moins à partir de 1 milliampère. Suivant les lignes à retard, le temps de montée observé est dû uniquement aux caractéristiques de ces lignes.

V - Observation du courant amplifié pendant le temps précédent l'étincelle.

1°) - Limites de l'observation.

Nous avons vu que l'observation directe du courant précédant l'étincelle n'était pas assez sensible. L'appareillage décrit ci-dessus permet d'observer des courants à partir de 2 microampères, voire de 0,1 microampère. L'amplificateur devra être protégé en permanence par l'écrêteur et comme nous l'avons vu précédemment, son domaine de linéarité est 0 à 14 milliampères. On ne pourra donc pas observer des courants d'amplitude supérieure à 14 mA, mais ceci ne pourra pas arriver comme l'a montré l'étude précédente. Encore

plus que pour l'observation directe du courant avant l'étincelle, il faut prendre des précautions pour que l'ensemble ne soit pas trop sensible au rayonnement.

Il est nécessaire de blinder l'amplificateur pour limiter au mieux l'amplitude des signaux parasites ainsi reçus par rayonnement. Des essais ont été fait en déconnectant l'entrée de l'amplificateur et en faisant déclencher l'oscilloscope avec une étincelle. Ces essais montrent que, pour des retards inférieurs à 500 nanosecondes, on a une grande fréquence d'apparition d'impulsions parasites.

Par contre, en utilisant des retards supérieurs à 5 microsecondes, la bande passante de l'ensemble est trop faible pour que les expériences puissent être faussées par un éventuel rayonnement.

La plupart des étincelles photographiées ont été obtenues par une légère augmentation de la haute tension et dans un régime de microdécharges.

2°) - Résultats photographiques. (fig. 9)

- 1 - Observation pendant 500 nanosecondes avant l'étincelle : (fig. 9a)

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, la forme du courant photographié peut être difficile à interpréter. Cependant, en changeant le gain de l'amplificateur, en regardant sa sortie lorsqu'il est déconnecté à l'entrée, on peut remarquer que d'éventuelles variations de courant avant l'étincelle sont plutôt dues à des parasites. Il a été cependant possible d'obtenir des photographies sur lesquelles on peut remarquer l'absence de fluctuation de courant supérieures à 4 microampères.

Le trait vertical au-dessous du point lumineux est dû aux microdécharges qui elles, ne déclenchent pas le balayage de l'oscilloscope.

- 2 - Observation pendant 5 microsecondes avant l'étincelle : (fig. 9b)

Dans cet intervalle de temps aucune variation de courant n'a été décelée. La forme légèrement oscillatoire de l'impulsion créée par

l'étincelle est due uniquement aux caractéristiques de l'ensemble ligne à retard-amplificateur.

- 3 - Observation pendant 500 microsecondes et 1,5 millisecondes avant l'étincelle; (fig. 9 c, d)

Avec ces lignes à retard on ne peut observer que des courants dont le temps de montée est supérieur à 50 ou 100 microsecondes.

Lorsque la résistance de protection de l'enceinte est faible (3 megohms), aucune variation de courant n'a été photographiée. Par contre avec une résistance de protection plus grande (20 megohms), nous avons pu photographier des microdécharges dans les intervalles de temps considérés, juste avant une étincelle.

Dans ce cas on sait que la fréquence des microdécharges augmente (1). Ces photographies ont été prises lors d'une montée de tension, et cette condition fait croître encore plus la fréquence des microdécharges.

- 4 - Des lignes à retard de plus grand temps de propagation étaient difficilement réalisables. Ces lignes à retard auraient permis de mieux situer les microdécharges précédant les étincelles. Avant l'appareillage expérimental utilisé, il nous est donc difficile d'établir un éventuel lien entre une étincelle et la microdécharge qui la précède. Cependant il nous a permis de vérifier que, mises à part les microdécharges, il n'y a pas de variation de courant d'amplitude supérieure à 0,1 ou 4 microampères, suivant les temps d'observation, et ceci pendant la milliseconde qui précède l'étincelle.

L'amplitude du courant de l'étincelle croît très rapidement du moins à partir de 4 à 5 microampères.

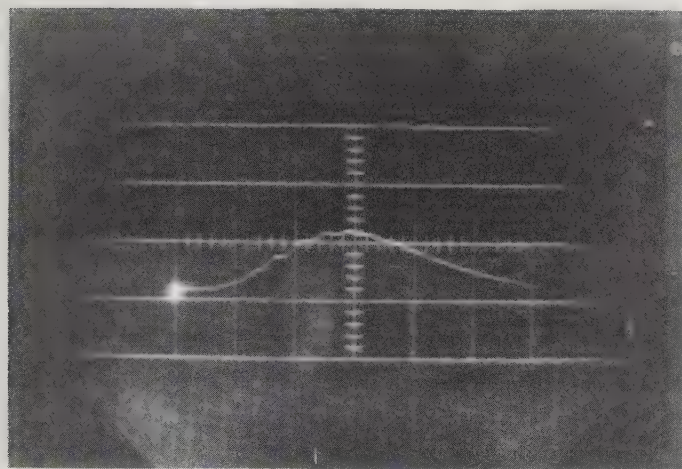


Fig. 7 : Etincelle

HT	50 KV
Balayage	20 ns/cm
Sensibilité	12,5 A/cm
Retard	20 ns

Fig. 8^a

HT	33 KV
Balayage	50 ns/cm
Sensibilité	800 mA/cm
Retard	100 ns

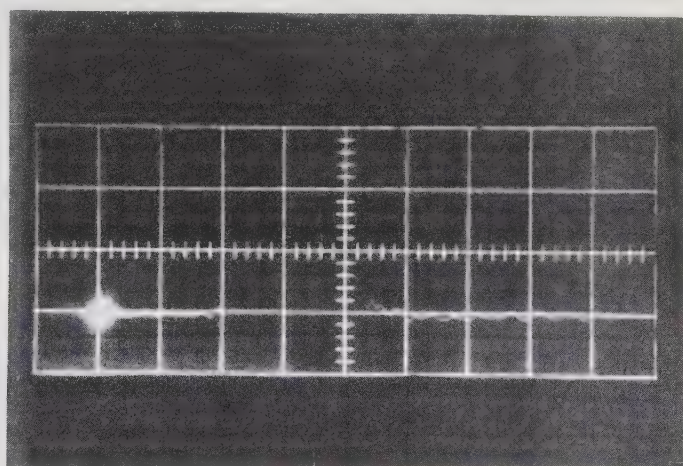


Fig. 8^b

HT	45 KV
Balayage	50 ns/cm
Sensibilité	160 mA/cm
Retard	80 ns

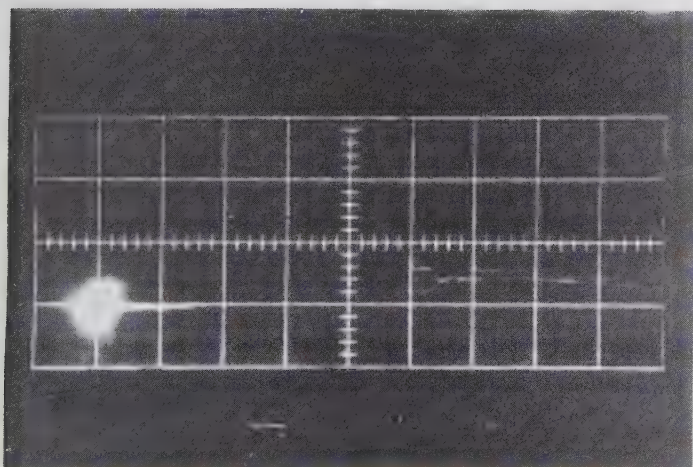


Fig. 8^c

HT 55 KV
 Balayage 50 ns/cm
 Sensibilité 50 mA/cm
 Retard 100 ns

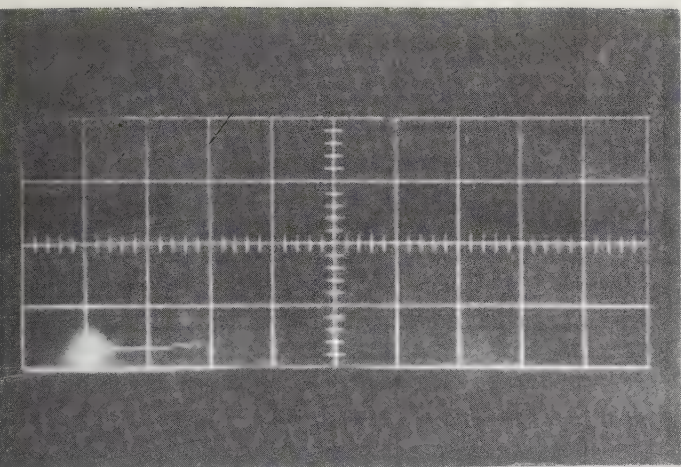


Fig. 8^d

HT 30 KV
 Balayage 100 ns/cm
 Sensibilité 8 mA/cm
 Retard 500 ns

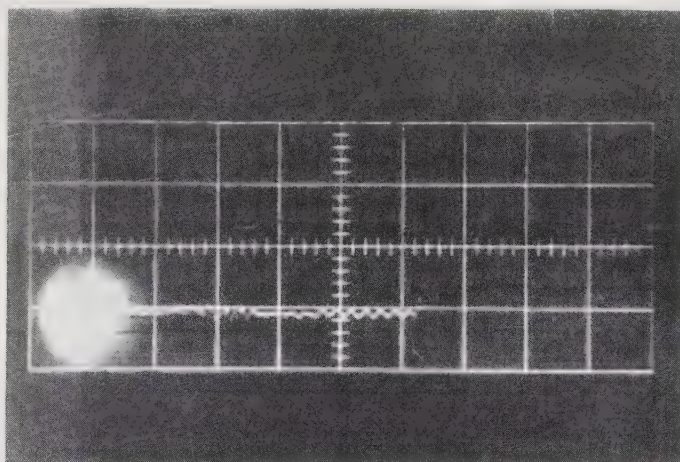
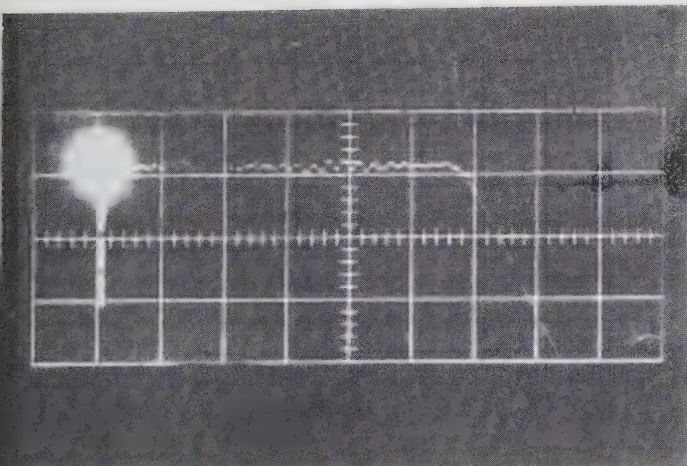


Fig. 9^a

HT 55 KV
 Sensibilité 48 μ A/cm
 Balayage 100 ns/cm
 Retard 500 ns

(la bande passante de l'ensemble a été réduite pour limiter l'ampleur du rayonnement).



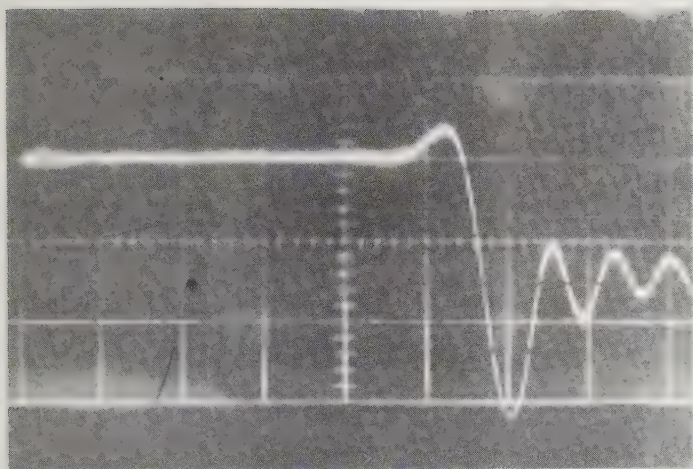


Fig. 9^b

HT	30 KV
Balayage	1 μ s/cm
Sensibilité	20 μ A/cm
Retard	5 μ s

(forme d'onde due à la ligne de retard)

Fig. 9^c

HT	80 KV
Balayage	200 μ s/cm
Sensibilité	4 μ A/cm
Retard	1 ms

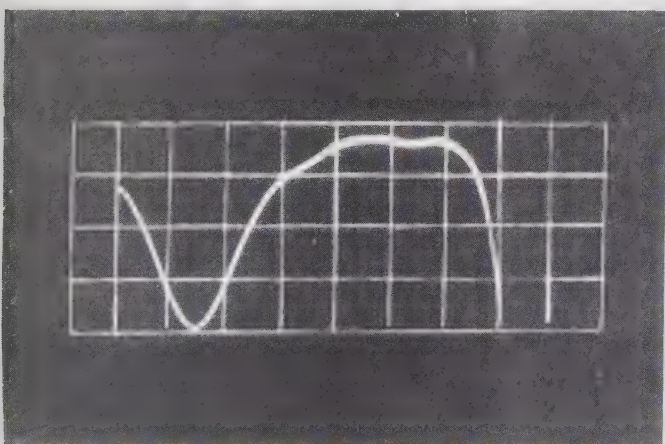
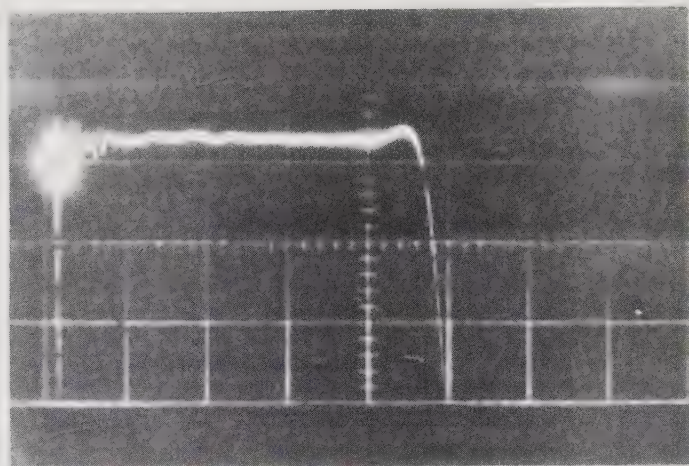


Fig. 9^d

HT	70 KV
Sensibilité	2 μ A/cm
Balayage	200 μ s/cm
Retard	1,5 ms

(exemple montrant une microdécharge précédant une étincelle)

TROISIEME PARTIE

TRAITEMENT DE DONNEES EN TEMPS REEL

PAR CALCULATEUR

A - UTILISATION D'UN CALCULATEUR EN TEMPS REEL POUR L'ETUDE DES PHENOMENES PRECEDANT UNE ETINCELLE.

I - Généralités.

Nous avons vu qu'il était difficile d'observer plus avant le temps précédant une étincelle de façon analogique. Pour des intervalles de temps précédant une étincelle supérieure à 1,5 milliseconde, seuls les courants impulsionnels nous semblaient intéressants à analyser. Nous entendons par courant impulsif tout courant dont la durée d'existence est inférieure à 1 seconde et les microdécharges rentrent dans cette catégorie. L'observation temporelle du courant précédant l'étincelle au-delà de 1,5 milliseconde n'étant plus possible, nous nous sommes attachés à l'étude statistique des grandeurs suivantes :

- charge électrique contenue dans les microdécharges précédant juste l'étincelle.
- intervalles de temps séparant ces microdécharges.
- intervalle de temps entre la dernière microdécharge précédant une étincelle et cette étincelle.

Un ordinateur connecté en temps réel et équipé d'organes périphériques adaptés permettait de rendre possible cette étude.

Le ordinateur utilisé est un PDP 8/S de Digital Equipment dont la capacité de la mémoire est de 4096 mots de 12 bits. La durée d'une instruction machine varie entre 28 microsecondes et 90 microsecondes. La facilité d'accès à l'interface en fait un organe de traitement destiné à travailler plutôt en temps réel que comme petit ordinateur. Une instruction machine permet tout transfert parallèle d'un registre vers le ordinateur et vice-versa, remettre un registre extérieur à "zéro", s'assurer que ces séquences peuvent être effectuées suivant que les organes périphériques le demandent ou non.

II - Appareillage électronique permettant de transformer les signaux transmis par l'enceinte à vide en signaux traitables par ordinateur.

1) Description générale.

Deux transformations du signal étaient nécessaires et ont été accomplies simultanément par :

- un système permettant de mesurer la charge électrique contenue dans une microdécharge et de la transformer en données digitales,
- un système permettant de mesurer les intervalles de temps entre deux signaux successifs;

deux microdécharges ou une microdécharge et une étincelle, et de les coder en digital.

De plus, l'ensemble devait pouvoir distinguer une étincelle d'une microdécharge.

Cet appareillage est suivi par les circuits d'attaque du calculateur, le calculateur lui-même et ses organes de sortie. L'ensemble peut être schématisé par le bloc diagramme ci-après (Fig. 10).

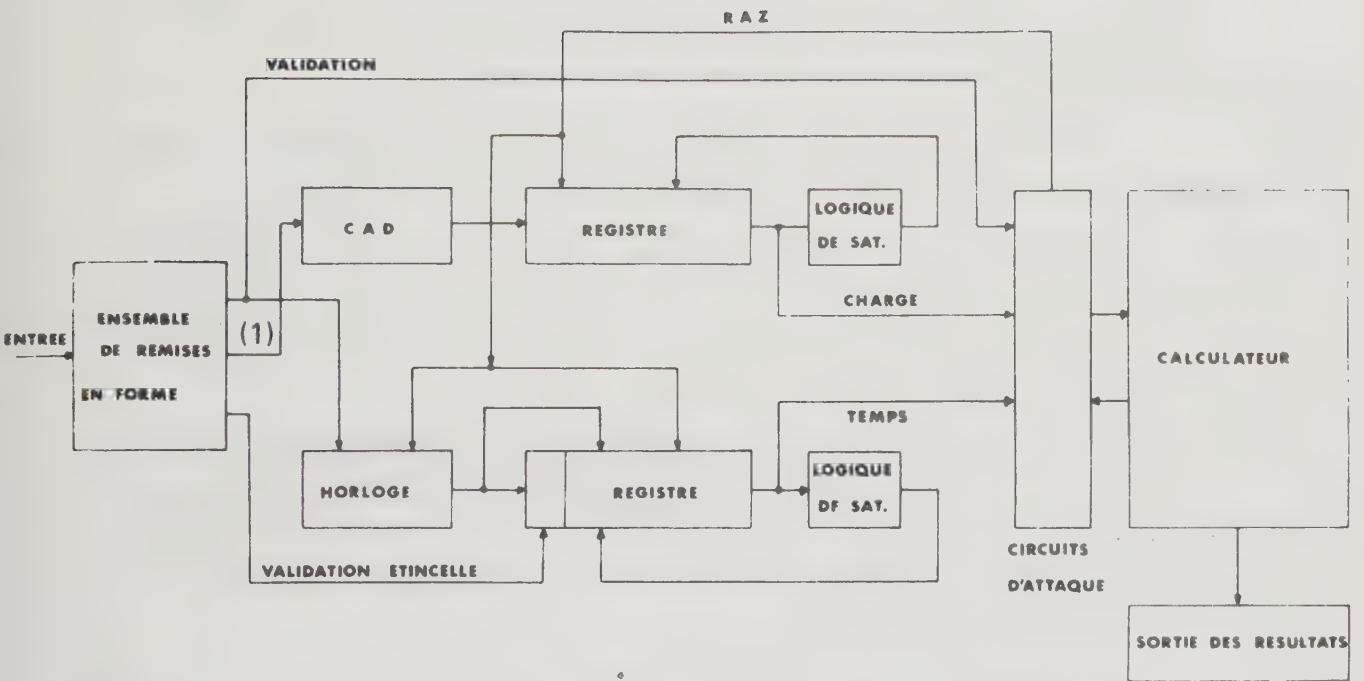
Le signal d'entrée est d'abord transformé par l'appareil I de mise en forme ; deux cas se présentent :

1°). ce signal est reconnu comme étant une microdécharge. L'appareil I transmet sa charge électrique au codeur analogique digital (CAD) et son codage remplit le registre correspondant. Simultanément le signal de validation arrête le fonctionnement de l'horloge ; quand celle-ci fonctionne, elle envoie des impulsions à fréquence fixe mais réglable dans un registre monté en compteur.

Le calculateur est alors autorisé à effectuer le transfert parallèle de ces deux registres par l'intermédiaire de ses circuits d'attaque et ensuite les remet à "zéro" en même temps qu'il valide à nouveau le fonctionnement de l'horloge. Le calculateur fait un traitement succinct sur ces données comme nous le verrons plus loin et quand ceci est terminé, il est prêt, si on le lui demande, à autoriser un nouveau transfert.

Les deux registres d'information possèdent chacun une logique de saturation : quand ils sont entièrement remplis, elles interdisent leur fonction au compteur jusqu'au prochain transfert.

2°). Ce signal est reconnu comme étant une étincelle. Alors un bistable particulier du registre des temps est mis à "1", ce qui permettra au calculateur après transfert des données de reconnaître qu'on est



(1) Sortie analogique

Fig. 10

en présence d'une étincelle. Dans ce cas l'information correspondant à la charge n'est plus prise en considération car elle est erronée. Le calculateur réalise le traitement qu'on lui demande de faire par un programme qui sera détaillé plus loin.

Il en sort les résultats sur télétype et ensuite peut acquérir de nouvelles données.

Le C. A. D. est du type Wilkinson et code en 64 canaux.

Le temps peut être codé jusqu'à 2048 canaux qui donne une grande dynamique à cette mesure.

2) Description de l'appareil I - Mise en forme :

Son fonctionnement est schématisé par le bloc diagramme (voir figure 11 a) et par le diagramme des signaux rencontrés aux différents points (Voir figure 11 b). Ces schémas appellent quelques remarques. (37).

- l'intégrateur qui permet de mesurer la charge n'est valide que pendant un certain temps à partir de l'apparition d'une microdécharge : le temps de la durée de la microdécharge plus un temps variable dont on verra la signification plus loin, plus un temps fixe de 100 microsecondes, temps qui permet largement au convertisseur analogique digital de faire la conversion. Le reste du temps, la capacité de cet intégrateur est court-circuitée par un transistor à effet de champ. Ceci lui confère une bonne stabilité dans le temps et une dynamique de fonctionnement très grande par rapport aux intégrateurs classiques à grande constante de temps.

- un allongeur de durée variable est utilisé à cause de la forme particulière que peut prendre le courant de certaine microdécharges. En effet certaines microdécharges ont une forme de courant très "hâchée" dans le temps : parfois leur courant peut descendre en-dessous du seuil du premier trigger, ce qui donnerait à la sortie du trigger plusieurs impulsions au lieu d'une seule correspondant à une seule microdécharge. Ceci aurait pour inconvénient de fausser les statistiques aussi bien de charges électriques que d'intervalles de temps entre les microdécharges par une tendance à la diminution de chacune de ces données. Cet allongeur est un organe non linéaire qui suit la variation du courant lorsque celui-ci croît, mais donne une variation plus lente en sortie lorsque le courant décroît à l'entrée. Ceci est équivalent à un

allongeur de durée variable avec l'amplitude du courant lorsqu'on s'intéresse à un courant seuil.

- le convertisseur analogique digital et l'horloge ne sont validés que si l'amplitude du courant sortant de l'amplificateur et sa valeur intégrée dépassent un certain seuil, ceci afin d'éviter de coder des impulsions parasites d'amplitude moyenne nulle.

- le détecteur d'étincelle est un dispositif à seuil réglable mis en parallèle sur l'entrée : son impédance d'entrée est grande et son temps de réponse court.

- le gain de l'amplificateur est réglable, ainsi que celui de l'intégrateur. On peut détecter des courants de 0,2 microampère , et des quantités d'électricité à partir de 20 picocoulombs.

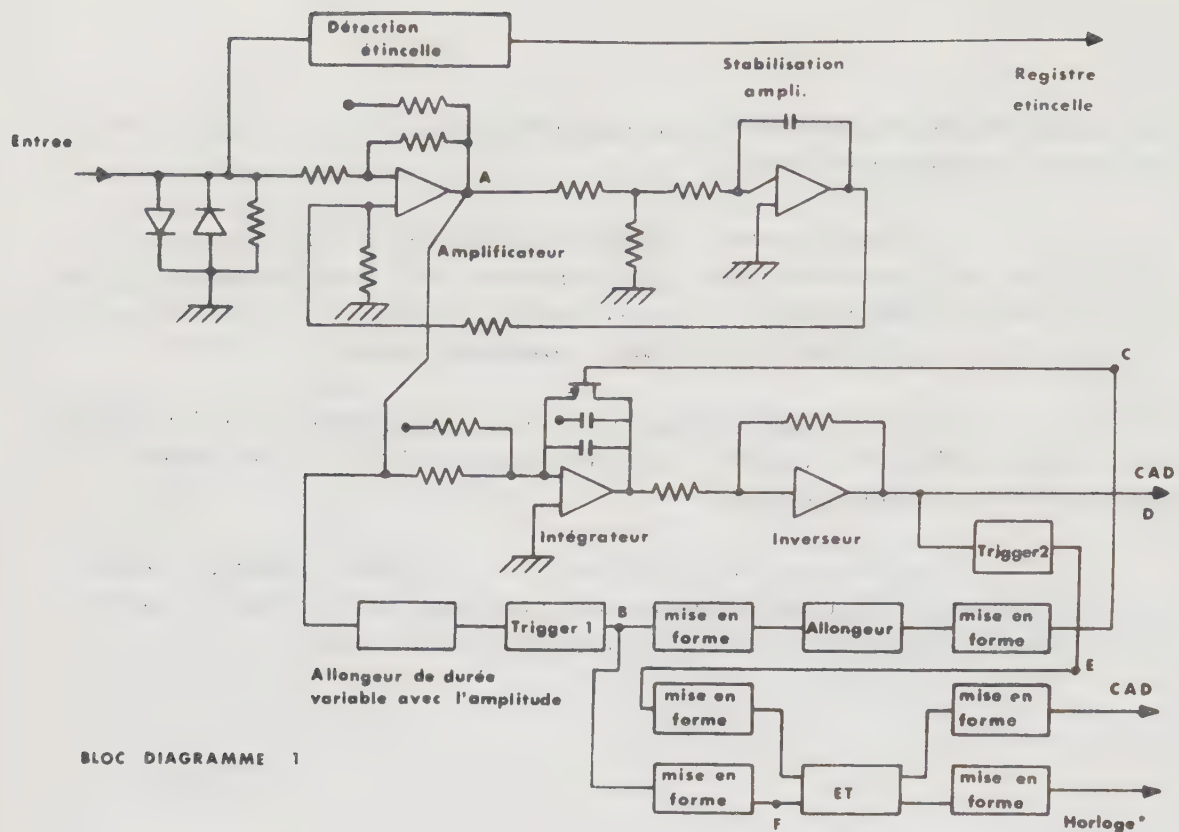


Fig. 11 a

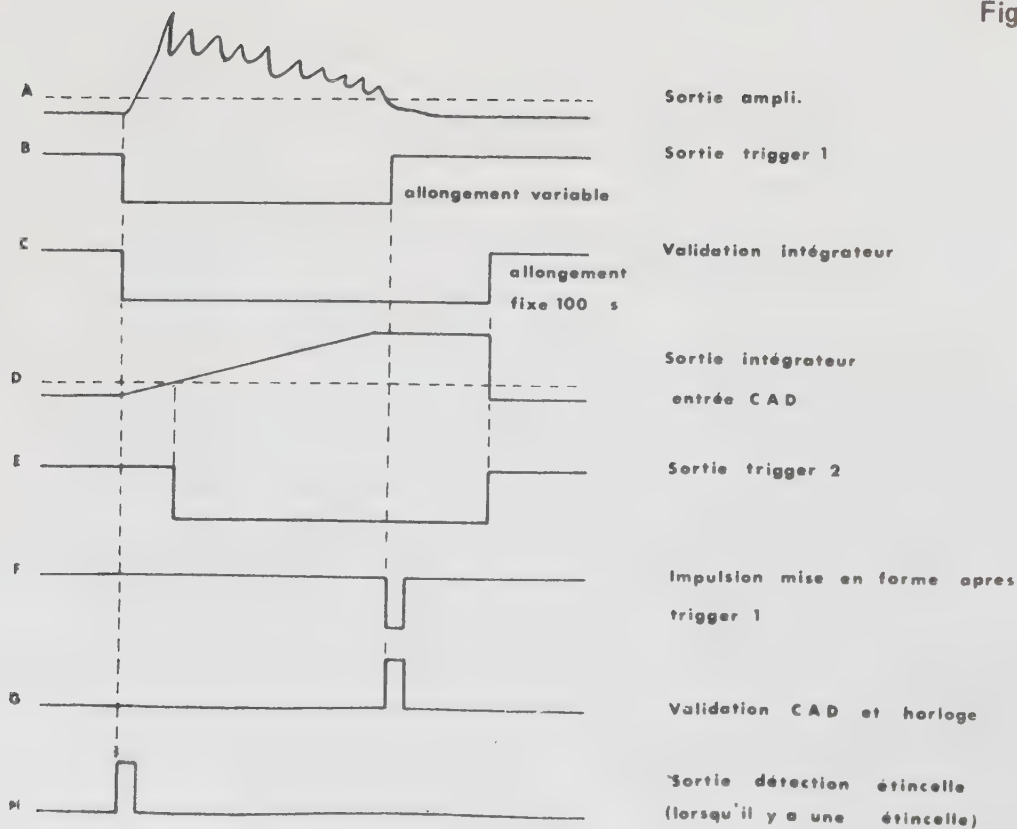


Fig. 11 b : Formes d'onde correspondant aux différents points de la figure 11a

III - Connection de l'appareillage au calculateur.

L'échange d'informations entre l'appareillage de mise en forme décrit ci-dessus au calculateur se fait par un ensemble de circuits d'attaque (extérieur au calculateur) lié à un interface (interne au calculateur). Toutes ces informations sont véhiculées sous formes digitales, ce qui revient à faire des échanges de contenu de registres à bistables. Ces échanges sont contrôlés par le calculateur par des impulsions synchronisées dans le temps par le déroulement d'un programme. Pour le P.D.P. 8/S en particulier, il existe des instructions appelées "I O T" (Input, Output, Transfert) qui, si elles sont rencontrées au cours de l'exécution d'un programme, réalisent les fonctions suivantes :

- vérification de l'état d'un organe périphérique.
- transfert d'une information de l'accumulateur de P.D.P. 8/S vers un registre extérieur ou vice-versa.
- Remise à zéro de registres extérieurs. Le choix du périphérique est codé dans l'instruction IOT. Pour comprendre la manière de connecter un appareil au PDP 8/S il faut distinguer deux notions :
 - . la programmation des instructions permettant le dialogue entre le calculateur et les périphériques ("Software")
 - . la réalisation d'une logique électronique véhiculant les informations ("Hardware").

Bien que ces opérations doivent être menées de front, il est plus facile de les étudier dans l'ordre indiqué.

1) - "Software".

Le programme consiste en une succession d'instructions qui dans le cas du PDP 8/S sont exécutées dans l'ordre où elles sont rencontrées dans la mémoire, à l'exception des instructions de saut. Chaque instruction réalise une opération logique simple portant :

- soit sur des données contenues, ou à enregistrer dans la mémoire
- soit sur des données contenues dans l'accumulateur et un autre registre (le LINK) qui en est le complément (Voir figure 12).

- soit pour réaliser un dialogue avec un organe périphérique (instruction "IOT").

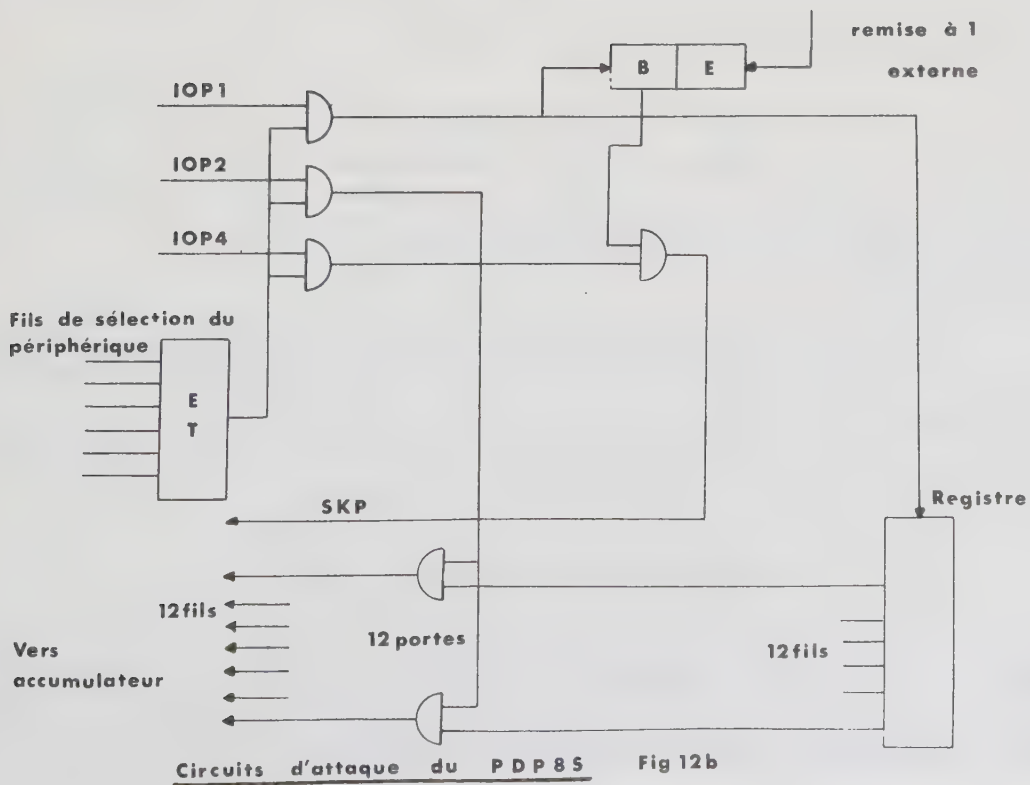
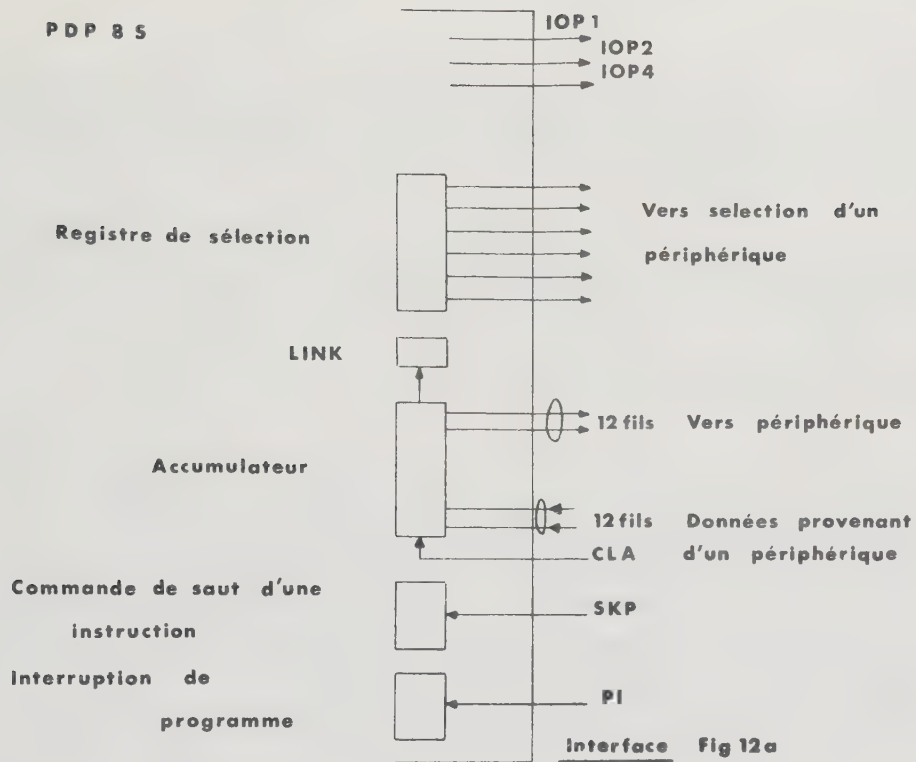
C'est ce dernier cas qui nous intéresse. L'instruction "IOT", comme toutes les autres instructions, est enregistrée dans la mémoire sous la forme d'un nombre binaire à 12 positions (ou nombre octal à 4 chiffres). Trois positions binaires caractérisent le fait que c'est une instruction "IOT" ; six positions binaires indiquent le numéro du périphérique sur lequel l'instruction porte : enfin les trois dernières positions binaires, suivant qu'elles valent "1" ou "0", génèrent ou non des impulsions décalées dans le temps (nombre maximum : 3) qui pourront être reçues par le périphérique et exécuteront les opérations logiques en fonction du câblage de ce périphérique.

Lorsque le programme rencontre une instruction "IOT", le calculateur sélectionne d'abord le périphérique indiqué par l'instruction "IOT" et ensuite fournit les diverses impulsions que l'utilisateur emploiera pour exécuter des opérations de transfert ou autres suivant ses besoins :

2) - "Hardware".

Pour la connexion d'un appareillage au calculateur regardons d'abord son interface en nous servant de la figure 12. On y distingue :

- trois sorties correspondant aux trois impulsions "IOP" délivrées par les "IOT".
- six sorties et leur six compléments, délivrant des niveaux électriques pour sélectionner un périphérique.
- deux fois douze sorties permettant le transfert parallèle de l'accumulateur vers l'extérieur ou vice-versa.
- une entrée "SKP" qui permet au programme de sauter une instruction dans son déroulement, si on envoie une impulsion dessus.
- deux entrées "CLA" et "PI" qui ne sont pas nécessaires à la compréhension du fonctionnement du PDP 8/S tel qu'on l'utilise ici.



Si l'on veut réaliser le transfert d'un registre extérieur dans l'accumulateur par exemple, il est nécessaire de construire des circuits d'attaque correspondant au schéma. (Voir figure 12b).

On y distingue une porte à 12 entrées et qui délivre un niveau électrique si l'instruction IOT porte le numéro du périphérique correspondant. Les impulsions ("IOP") définies par la même instruction "IOT" peuvent alors traverser les portes d'entrées correspondantes et effectuer les opérations déterminées par le câblage.

Pour exécuter le transfert, le calculateur demande au périphérique s'il est prêt ou non à le faire. Ceci se fait par une instruction "IOT-4" qui envoie une seule impulsion sur l'entrée 4. L'état du périphérique est indiqué par le bistable d'état "BE" ; s'il n'est pas prêt, le bistable ne laisse pas passer l'impulsion correspondante et l'entrée "SKP" n'est pas validée. Il faut réaliser le programme pour qu'il revienne en arrière (par une instruction de saut) et réaliser à nouveau une instruction "IOT-4" jusqu'à ce que le bistable d'état indique que le périphérique est prêt à exécuter le transfert. Dans ce cas l'entrée "SKP" est validée et fait sauter une instruction dans le déroulement du programme. L'instruction suivante est l'instruction de transfert proprement dite et on l'appelle "IOT-3".

Elle envoie d'abord une impulsion sur l'entrée 2 qui réalise le transfert en parallèle du registre dans l'accumulateur et ensuite une impulsion sur l'entrée 1 qui réalise la remise à "zéro" des bistables du registre et du bistable d'état. Le bistable d'état sera remis à "1" par une logique externe.

On peut ainsi attaquer plusieurs périphériques en parallèle : seul le périphérique considéré par l'instruction IOT correspondante, sera validé ; cela dépend uniquement de la manière dont sont branchés les fils de sorties de sélection de périphérique sur le périphérique choisi.

IV - Fonctions du Calculateur.

Les diverses fonctions du calculateur sont commandées par un programme écrit en langage assembleur (voir annexe) MACRO-8 qui occupe 1200 adresses dans la mémoire. Il faut encore réserver 300 adresses supplémentaires pour des programmes annexes de lecture ou

autre. Ainsi il reste environ 2600 adresses dans lesquelles pourront être stockées les informations : charge des microdécharges et intervalle de temps les séparant. Ceci permet donc de garder en mémoire les informations sur 1300 microdécharges au maximum. En fait on se limitera à 1280 microdécharges : le calculateur étant organisé en "pages" de "128 "mots, les données occupent ainsi un nombre entier de "pages" ce qui en facilite la gestion.

Le programme, une fois enregistré, permet de réaliser les séquences suivantes :

Au fur et à mesure que les microdécharges arrivent, le calculateur classe leurs charges et les intervalles de temps les séparant dans l'ordre d'arrivée jusqu'à concurrence de 1280. A partir de 1280 microdécharges, les données correspondantes sont enregistrées, en laissant de côté les données correspondant aux premières microdécharges, de telle façon qu'on garde les informations correspondant aux 1280 dernières microdécharges. Lorsqu'une étincelle survient on relève l'intervalle de temps qui la sépare de la dernière microdécharge et un cycle de traitement commence.

D'abord le temps séparant la dernière microdécharge de l'étincelle est édité.

Ensuite, trois cas se présentent :

- le nombre de microdécharges précédant l'étincelle est supérieur à 1280 : le nombre total de microdécharges est édité. Ensuite les 1280 microdécharges sont classées en 5 groupe de 256 sur lesquels on réalise les histogrammes suivants :

- un histogramme de charges en 16 classes.
- un histogramme d'intervalles de temps en 16 classes.
- un histogramme de la variable à deux dimensions, amplitude de la charge d'une microdécharge, intervalle de temps la séparant de la suivante en 16 classes.
- un histogramme de la variable à deux dimensions, amplitude de la charge d'une microdécharge, intervalle de temps la séparant de la précédente en 16 classes.

Chacun de ces histogrammes est édité pour chaque groupe de 256 microdécharges.

Ensuite les histogrammes identiques mais chacun en 64 classes et portant sur le nombre total de microdécharges sont élaborés et édités.

Enfin on édite les informations (charge et intervalle de temps) sur les 64 dernières microdécharges dans l'ordre inverse où celles-ci sont apparues avant l'étincelle. Le calculateur est alors prêt pour un nouvel enregistrement.

- Le nombre de microdécharges est compris entre 64 et 1280 : la séquence de traitement est la même que celle qui précède : seul le nombre d'histogrammes partiels est limité par le nombre de groupes de 256 microdécharges enregistrées.

- Le nombre de microdécharges est inférieur à 64 : seules les charges et les intervalles de temps sont édités dans l'ordre inverse où les microdécharges sont apparues avant l'étincelle.

B - RESULTATS EXPERIMENTAUX.

Dans toutes les expériences où le calculateur a été utilisé, nous avons travaillé à tension constante entre les électrodes et nous n'avons pas pris en considération les données obtenues lors d'une montée en tension.

Deux sortes d'étude ont été faites :

- Une étude préliminaire à forte résistance de protection : dans ce cas il y a peu d'étincelles mais une grande fréquence de microdécharges.

- Une étude plus complète à faible impédance de protection : la proportion des microdécharges par rapport aux étincelles y est beaucoup moindre que dans le cas précédent. Les résultats obtenus ne pourront pas être traités de la même manière.

A chacune de ces études correspondent des courbes obtenues à partir des enregistrements statistiques et nous serons amenés à y appliquer des tests d'adéquation pour vérifier certaines hypothèses.

Le temps d'enregistrement de données correspondant à une microdécharge étant inférieur à 700 microsecondes, les expériences ainsi réalisées deviennent un prolongement de celles réalisées avec les lignes à retard (retard maximum : 1,5 milliseconde).

I - ETUDE PRELIMINAIRE A FORTE RESISTANCE DE PROTECTION:

Dans cette étude nous avons mis une résistance de protection de 120 mégohms en série avec la source de haute tension. Dans ces conditions il y a peu d'étincelles (1). Par contre la fréquence des microdécharges est assez élevée surtout vers 80 kilovolts de différence de potentiel entre les électrodes. Ceci nous a permis d'obtenir un très grand nombre de microdécharges entre les étincelles et dans la plupart des cas ce nombre excédait de beaucoup 1280, même compte-tenu du temps mort dû à l'édition des résultats et pendant lequel il n'y a aucun enregistrement. Le programme enregistré dans le calculateur permet d'obtenir des histogrammes d'intervalles de temps et de charges transportées par les microdécharges par tranche de 256 avant une étincelle. Nous avons ainsi cinq histogrammes au maximum par variable (intervalle de temps et charge) avant une étincelle. Pour quelques enregistrements faits dans ces conditions expérimentales nous avons tracé les fonctions de répartition empiriques correspondant aux diverses tranches de 256 microdécharges. Les diverses courbes (voir figure 13) ont été soumises au test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov à deux échantillons (voir deux paragraphes plus loin). Le test a permis de conclure que dans aucun des cas, les courbes fonctions de répartition ne proviennent de la même loi statistique même celles qui correspondent à une même étincelle.

Bien que le nombre des résultats soit faible, ces courbes nous ont amené à quelques observations :

- Avant chaque étincelle la charge électrique transportée par les microdécharges va en croissant jusqu'à l'étincelle.

- De la même façon, à partir d'un certain moment, les intervalles de temps séparant deux microdécharges vont en diminuant au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'apparition de l'étincelle.

Ces résultats ne sont valables que statistiquement et lorsque l'on considère les microdécharges par paquets de 256, mais ils semblent significatifs : avant l'apparition de l'étincelle, le courant moyen transporté par les microdécharges croît rapidement. Pour le vérifier à partir des résultats donnés par le calculateur, on peut, pour chaque paquet de 256 microdécharges calculer l'intervalle de temps total T , pendant lequel elles sont apparues, et la charge totale Q , qu'elles ont transportée. Le rapport $I = Q/T$, donne la valeur du courant moyen transporté pendant l'intervalle T . Les courbes représentatives de I en fonction du temps, ont été tracées pour quelques étincelles (Voir figure IX). Il ne faut surtout pas voir dans ces courbes l'évolution du courant moyen qui traverse effectivement l'espace inter-électrode avant une étincelle : nous avons vu dans la première partie qu'avec l'appareillage que nous avons mis au point, nous n'avions pas la possibilité de le détecter si son amplitude était inférieure à 300 nanoampères. Ces courbes sont représentatives uniquement de l'évolution du courant moyen transporté par les microdécharges et qui a été calculé d'après les résultats donnés par le calculateur et non mesuré par mesure directe.

On peut s'apercevoir ainsi que sur les enregistrements que nous avons obtenus, la valeur du courant est au moins multipliée par 10 au cours de la minute qui précède l'étincelle.

II - RESULTATS OBTENUS POUR UNE RESISTANCE DE PROTECTION DE 3 MEGOHMS.

1) De la diversité des résultats.

Si on insère une résistance de protection de 3 mégohms en série avec le générateur de haute tension, la fréquence des microdécharges est beaucoup plus faible que précédemment. Par contre nous obtenons des étincelles plus rapprochées dans le temps de sorte que le nombre de microdécharges qui apparaissent entre deux étincelles ne dépasse que très rarement 300 à 400. Il est donc moins aisé d'observer une évolution dans le temps du régime des microdécharges apparues entre deux étincelles.

Comme il est plus facile d'obtenir un plus grand nombre d'étincelles dans ce cas nous nous sommes attachés à faire des études comparatives sur les dernières microdécharges précédant une étincelle :

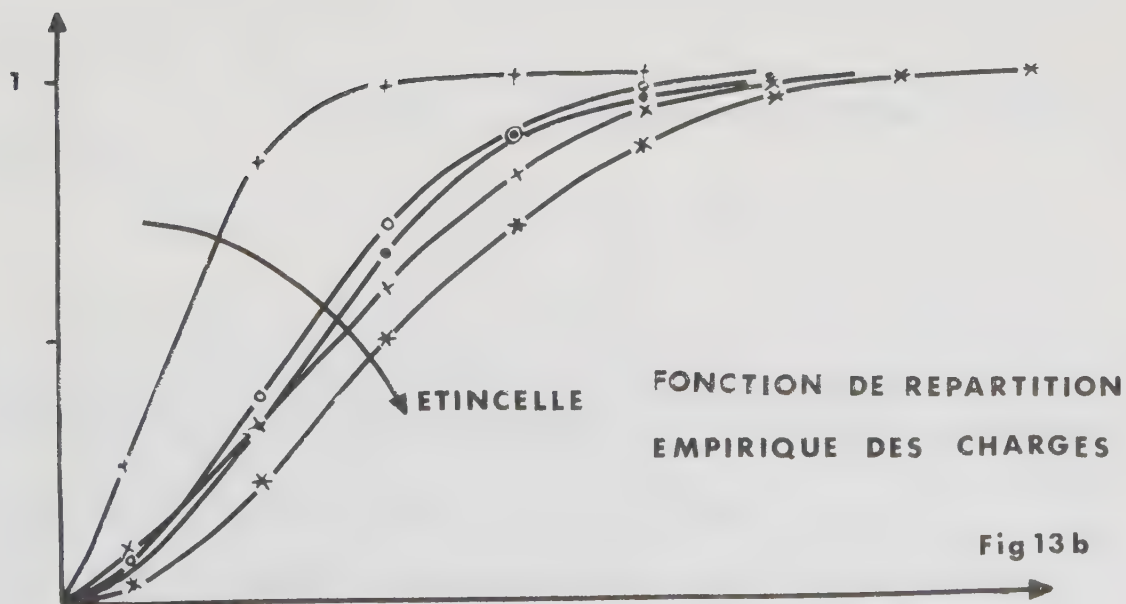
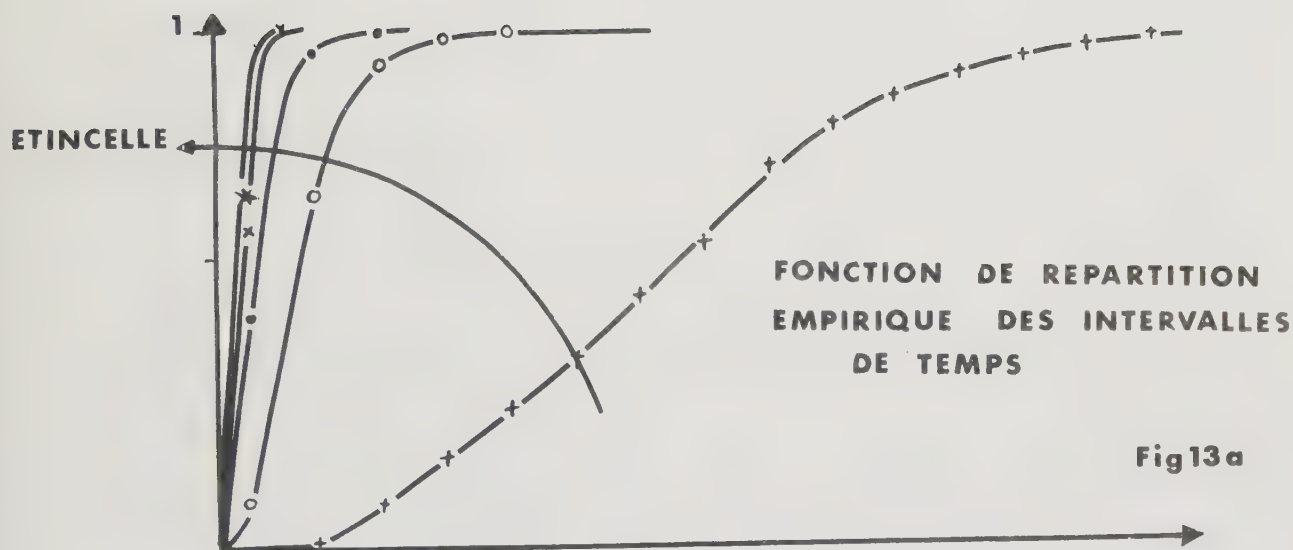


Fig. 13 a et b . Pour chaque figure les 5 courbes résultent de 5 paquets successifs de 256 microdécharges (total 1280) juste avant l'étincelle. La flèche indique le sens de l'évolution dans le temps précédant l'étincelle.

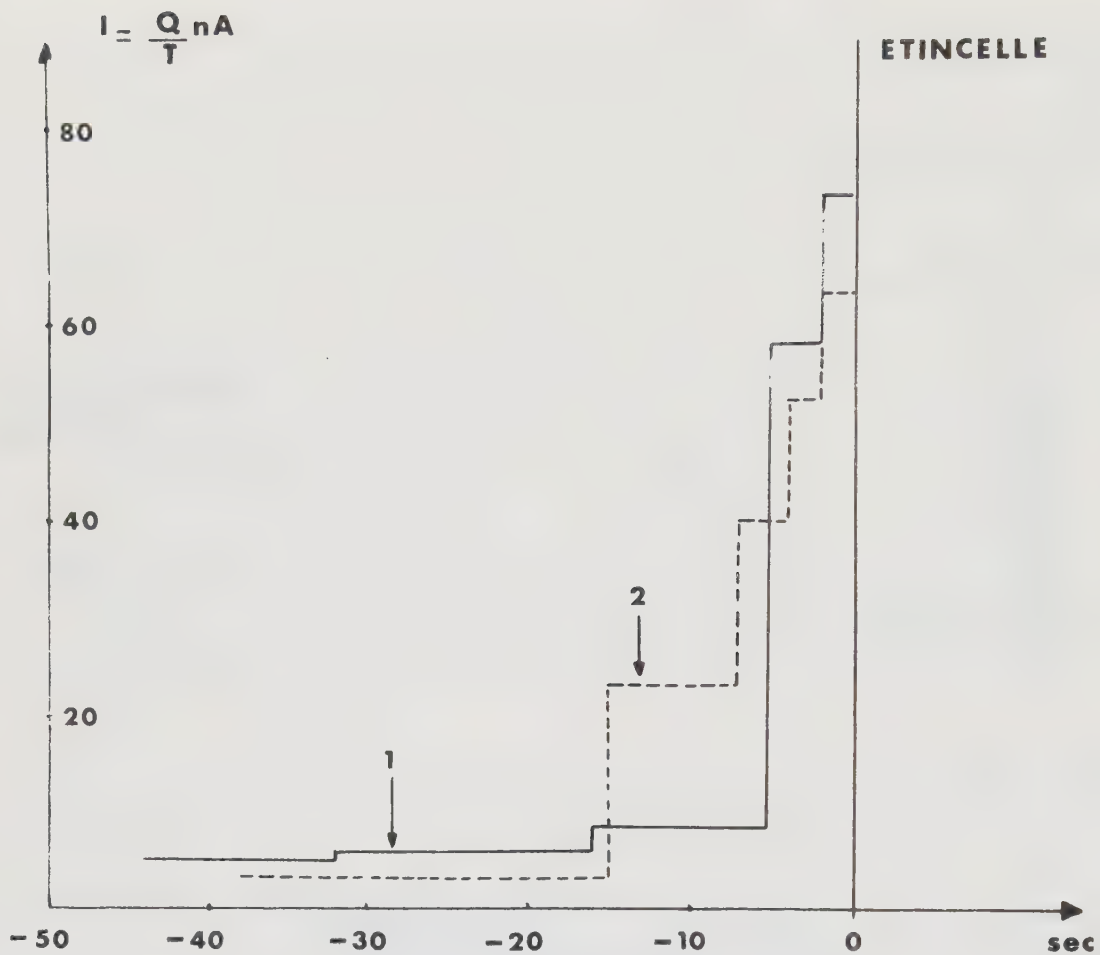


Fig 13c

Chaque palier représente le courant moyen transporté par 256 microdécharges pendant le temps correspondant à leur apparition.

(1) courbe tracée à partir des résultats de la figure 13 a et b.

(2) autre courbe pour une autre étincelle.

- temps séparant la dernière microdécharge précédant l'étincelle de l'étincelle elle-même.
- quantité d'électricité transportée par la dernière microdécharge.
- intervalles de temps séparant les dernières microdécharges.
- quantité d'électricité transportée par les dernières microdécharges.

Cependant nous avons vu que les caractéristiques des microdécharges évoluaient dans le temps avant l'étincelle quand la résistance de protection valait 120 mégohms. Sans l'avoir vérifié de façon systématique, il est vraisemblable que les quantités d'électricité et les intervalles de temps séparant les microdécharges ne forment pas des variables stationnaires au sens statistique, entre les étincelles. De plus, les paramètres moyens des microdécharges précédant les étincelles, varient d'une étincelle à l'autre et surtout d'une expérience à l'autre. Par conséquent il est impossible de comparer dans l'absolu les caractéristiques des dernières microdécharges précédant l'étincelle, pour plusieurs étincelles. Nous avons contourné la difficulté en normalisant les caractéristiques d'une microdécharge par rapport aux microdécharges précédant une même étincelle, et c'est à partir de ces résultats normalisés que nous pourrions avoir des éléments de comparaison d'une étincelle à l'autre.

2) Normalisation des résultats relatifs à plusieurs étincelles.

On considère comme variable aléatoire

- soit le temps séparant la dernière microdécharge avant l'étincelle et l'étincelle.
- soit l'amplitude de la charge de la n , ième microdécharge avant l'étincelle.
- soit l'intervalle de temps séparant la n , ième de la $n+1$ ième microdécharge avant l'étincelle.

Pour comparer les différentes réalisations de ces variables aléatoires nous sommes amenés à faire un changement de variables.

On notera par $P\{X \leq x\}$ la probabilité pour que la varia-

ble aléatoire X soit inférieure au nombre x . On peut alors définir la fonction de répartition de X par $F(x) = P[X \leq x]$. Soit $y = F(x)$; on peut aussi considérer y comme une réalisation d'une certaine variable aléatoire $Y = F(X)$. On sait que $F(x)$ est une fonction monotone non décroissante, par conséquent il y a une bijection entre les variables aléatoires X et Y et il en est de même des réalisations correspondantes. Cherchons à définir la fonction de répartition G de Y . On a :

$$G(y) = P[Y \leq y] \text{ par définition}$$

$$G(y) = P[F(X) \leq F(x)]$$

$G(y) = P[X \leq x]$ car F est une fonction monotone non décroissante. Ainsi :

$$G(y) = F(x)$$

$$G(y) = y$$

Sachant que $F(x)$ est une fonction dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1, on peut tracer la fonction de répartition pour Y ce qui donne :

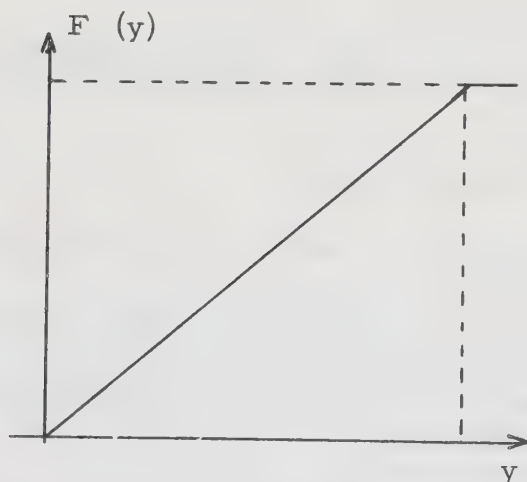


Fig. 14 - Fonction de répartition théorique

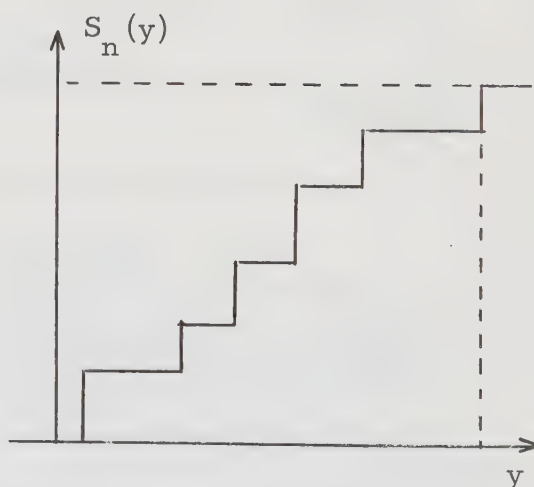


Fig. 15 - Fonction de répartition empirique

La variable aléatoire Y est uniformément répartie sur l'intervalle $[0 - 1]$: la fonction densité de probabilité

$$\frac{dG(y)}{dy} = g(y) \text{ vaut } 1 \text{ pour } 0 \leq y \leq 1 \text{ et vaut } 0 \text{ partout}$$

ailleurs. La fonction de répartition est représentée par une droite de pente 1 sur l'intervalle $[0 - 1]$ et ceci quelle que soit la fonction de répartition $F(x)$. En pratique, si on a n réalisations x_i , i variant de 1 à n , de n variables aléatoires X_i , on fait correspondre n réalisations $y_i = F_i(x_i)$ de Y , ceci en supposant connues les différentes fonctions de répartition $F_i(x)$ correspondant aux différents x_i . On peut alors tracer la fonction de répartition empirique $S_n(y)$ correspondante qui est une courbe en escalier : l'amplitude de chaque saut est

$$\frac{k}{n} \quad (0 \leq k \leq n) \text{ pour une valeur } y_k \text{ donnée, si on a eu } k \text{ réalisations}$$

ayant la valeur y_k . On s'est ainsi affranchi de la diversité des variables aléatoires X_i en les remplaçant par une seule variable aléatoire Y et dont les différents y_i en sont les réalisations.

On montre que si le nombre de réalisations devient infini, la courbe $S_n(y)$ tend vers la courbe $G(y)$ sous l'hypothèse que les fonctions de répartition $F_i(x_i)$ correspondant à chaque réalisation x_i de X est la bonne. Nous verrons plus loin ce que l'on peut en conclure quand le nombre de réalisations est fini.

Pour les variables correspondant aux microdécharges, il apparaît une difficulté : nous ne connaissons pas de façon certaine la fonction de répartition $F(x)$ de ces différentes variables pour chaque étincelle. Cependant nous pouvons en avoir une approche en considérant la fonction de répartition empirique $U_m(x)$ correspondant à m microdécharges avant une étincelle, approche d'autant plus valable que m est grand. Nous avons vu aussi que les variables intervalles de temps et amplitude, ne sont plus stationnaires statistiquement. Cependant sur un intervalle de temps pas trop long on peut les considérer comme stationnaires globalement. Il faut donc faire un compromis en choisissant un assez grand m pour que $U_m(x)$ approche assez bien $F(x)$, mais pas trop grand pour que $U_m(x)$ ait un sens. Nous avons pris la valeur de m égale à 64 (8×8) : on peut admettre que $U_m(x)$ diffère de $F(x)$ comme $1/\sqrt{m}$ et que passer de 64 à 100 par exemple n'y change pas grand chose, mais par contre le temps d'enregistrement

qui est approximativement proportionnel à m varie presque du simple au double. La valeur de $m = 64$ correspond à des enregistrements de durée maximum 10 minutes avant l'étincelle. Ainsi, par exemple, à l'amplitude q_{ij} la charge électrique de la i ème microdécharge avant la j ème étincelle, nous avons fait correspondre un nombre q'_{ij} compris entre 0 et 1 déduit de la fonction de répartition empirique $U_{64,j}(q)$, ($m=64$) tracée à partir des 64 dernières microdécharges précédant la j ème étincelle.

Nous avons fait la même transformation sur les intervalles de temps : $t'_{i,j}$ déduit de $V_{64,j}(t)$ correspond à l'intervalle de temps séparant la i ème microdécharge de la $(i + 1)$ ème avant l'étincelle j .

Le nombre $t'_{0,j}$ correspond à l'intervalle de temps entre la j ème étincelle et la microdécharge qui la précède ; $t'_{0,j}$ a été déduit de $T_{64,j}$ et permettra de comparer l'intervalle de temps, entre une étincelle et la microdécharge qui la précède, avec les intervalles de temps séparant deux microdécharges.

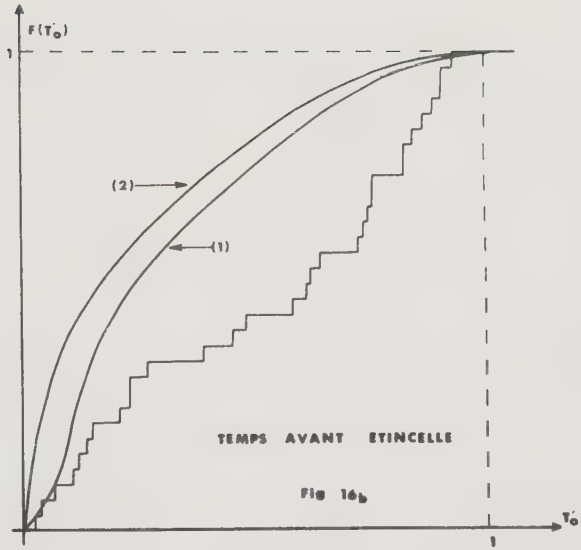
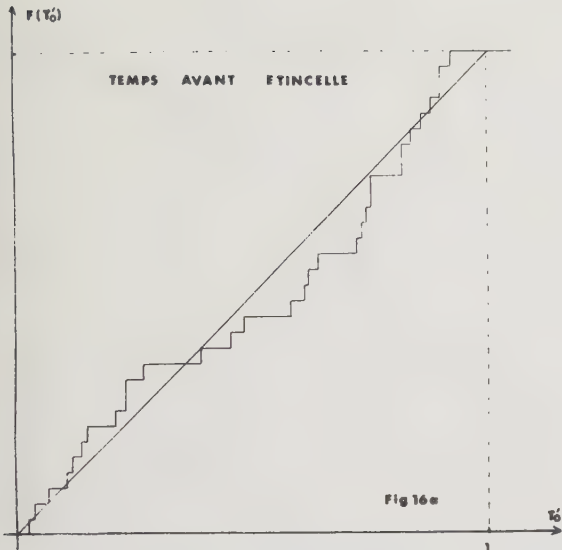
Ensuite, à partir de n étincelles, nous avons tracé les fonctions de répartition empirique $Q_i(q'_{ij})$ et $T_i(t'_{ij})$ correspondant aux diverses valeurs q'_{ij} et t'_{ij} pour un i fixé (pour une microdécharge de même rang avant une étincelle).

Nous avons tracé ces courbes pour les six dernières microdécharges précédant une étincelle, et ceci pour 31 étincelles, soit :

- les 6 courbes correspondant aux quantités d'électricité des 6 dernières microdécharges (Fig. 17).

- la courbe correspondant à l'intervalle de temps séparant une étincelle de la précédente microdécharge (Fig. 18)

- les 5 courbes correspondant aux intervalles de temps entre les 6 dernières microdécharges précédant les étincelles (Fig. 18).



- (1) courbe correspondant à $f(x) = a \cdot \exp(-ax)$
 (2) courbe correspondant à $f(x) = a^2 x \cdot \exp(-ax)$

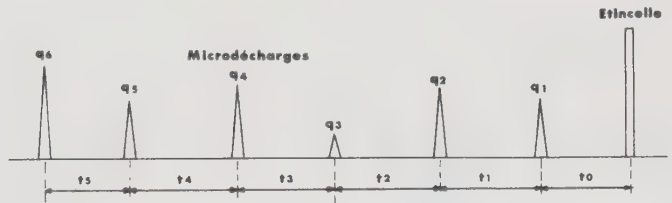
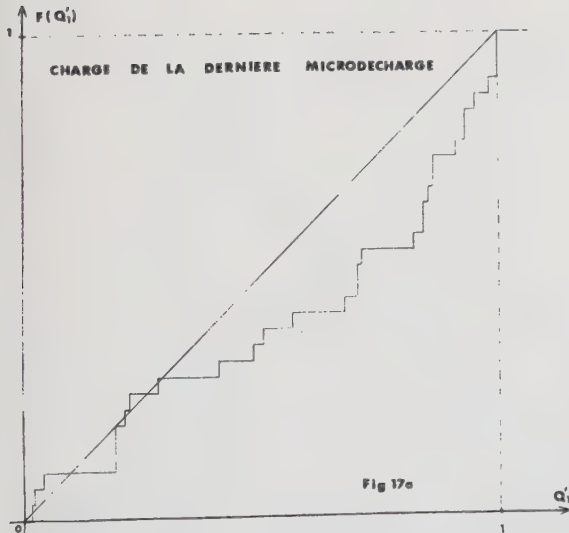
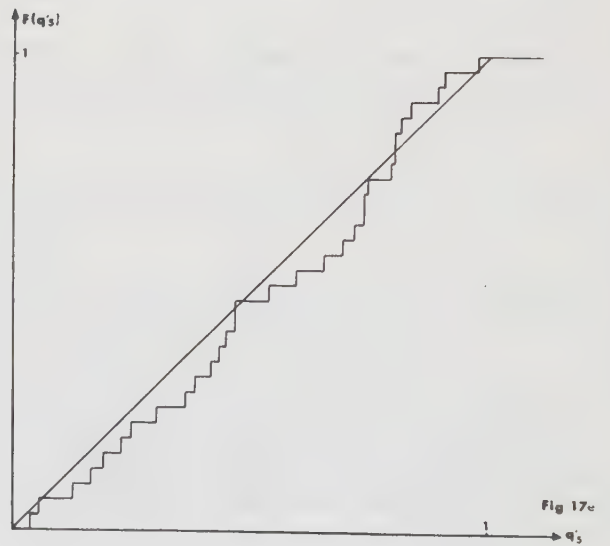
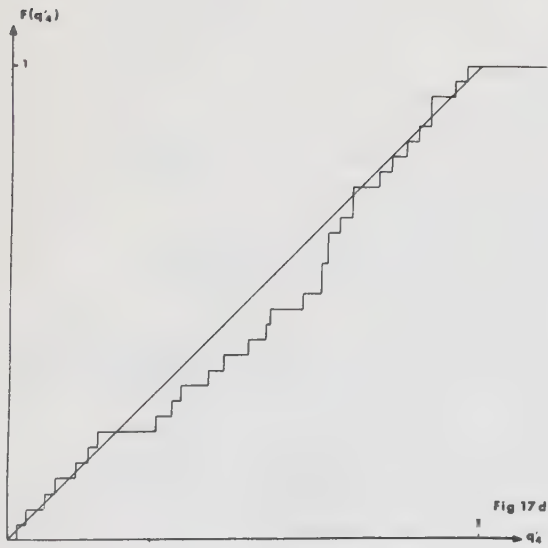
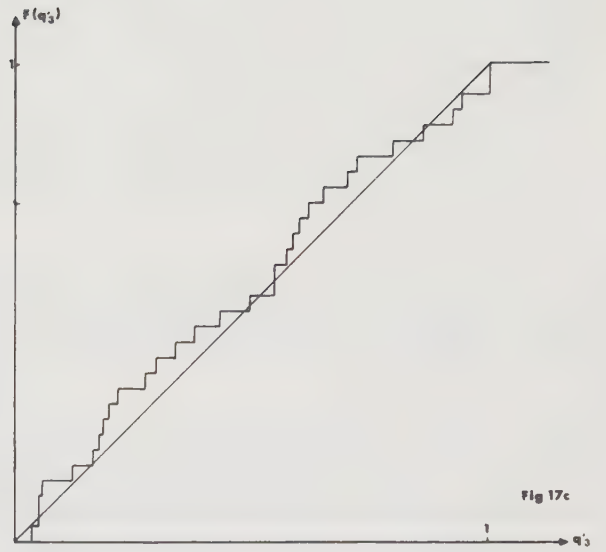
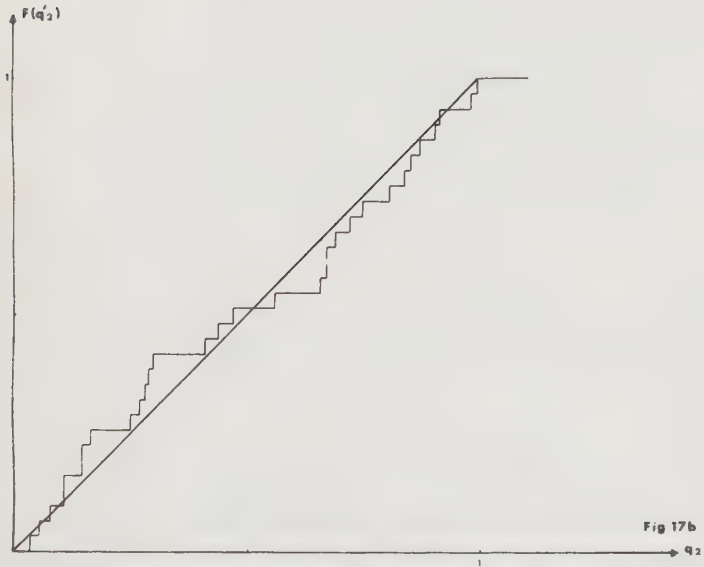


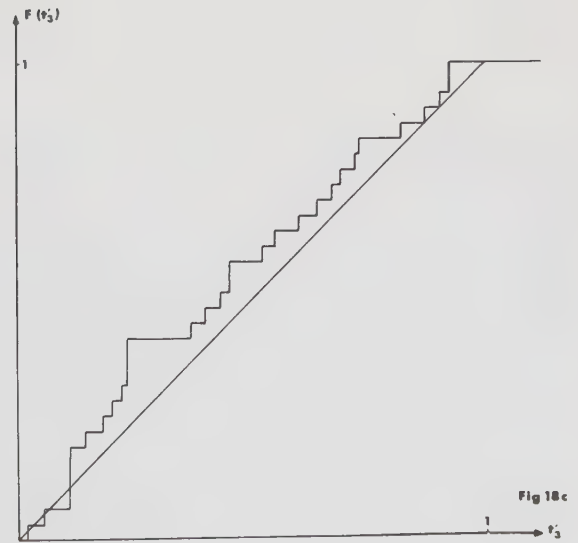
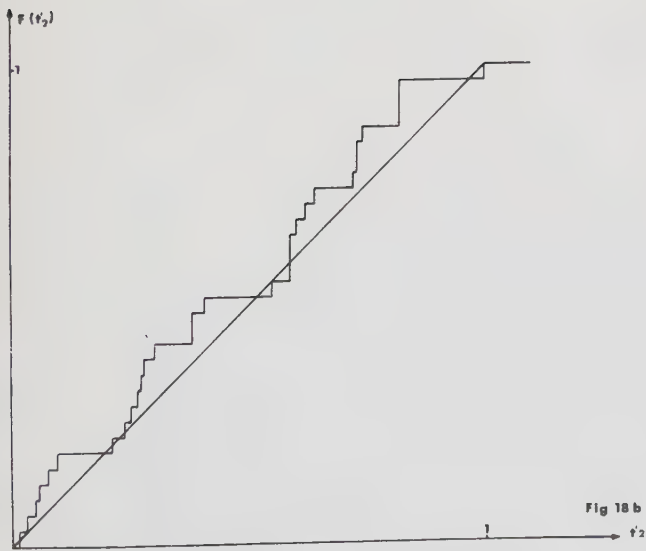
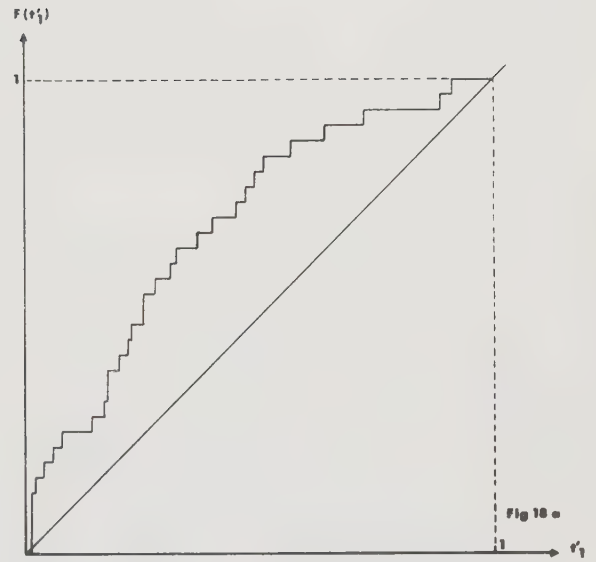
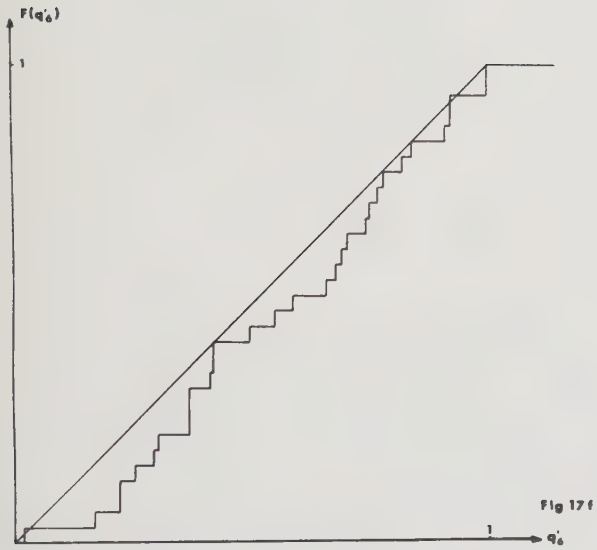
Schéma explicatif pour les figures 16-17-18 :

- t_0 = intervalle de temps séparant l'étincelle de la microdécharge qui la précède.
- t_1 à t_5 = intervalles de temps entre les 6 dernières microdécharges.
- q_1 à q_6 = charges électriques des 6 dernières microdécharges

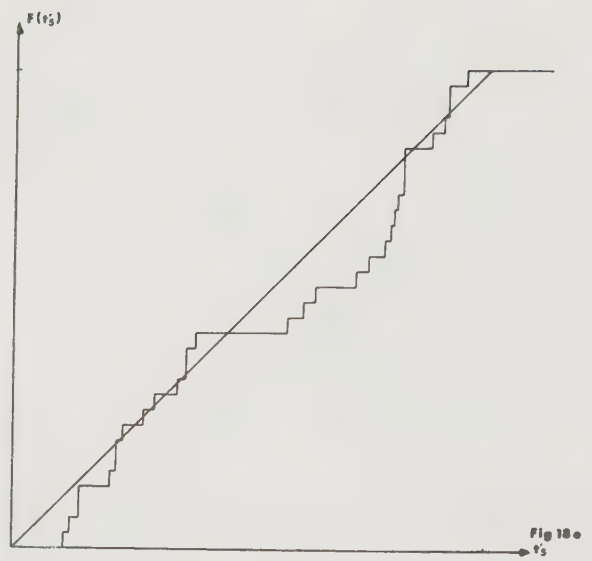
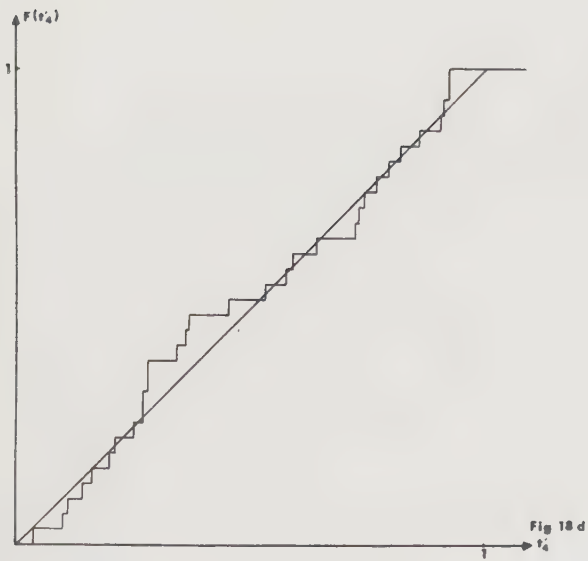
Figures 16 a-b ; 17a



Figures 17b-c-d-e



Figures 17f ; 18a-b-c



Figures 18d-e

Compte-tenu du nombre fini de réalisations, il est tout à fait normal que ces courbes soient différentes de la droite bissectrice du premier quadrant sur l'intervalle $[0 - 1]$. Cependant, elles s'en éloignent plus ou moins suivant les différents paramètres étudiés et des tests appropriés permettent de rejeter ou non l'hypothèse comme quoi elles tendraient vers cette droite bissectrice si n devenait infini.

III - TESTS DE KOLMOGOROV-SMIRNOV.

Les tests de Kolmogorov-Smirnov sont des tests d'adéquation qui s'appliquent à des fonctions de répartition empiriques. Il y en a un qui permet de comparer une fonction de répartition empirique à une fonction de répartition qu'on se donne à priori. L'autre permet de comparer deux fonctions de répartition empiriques. Kolmogorov (34) a étudié la densité de probabilité de la variable aléatoire D_n définie par : $D_n = \text{Maximum de } |F(x) - S_n(x)|$ où $S_n(x)$ est une fonction de répartition empirique sur n réalisations à comparer à une fonction connue $F(x)$. Pour n donné, il existe des tables (36) qui donnent la probabilité pour que $D_n = \text{Max } |F(x) - S_n(x)|$ soit supérieur à un nombre donné, D . Si D_n est supérieur à D on rejette l'hypothèse comme quoi $S_n(x)$ est une réalisation de $F(x)$ avec le niveau de signification égal à la probabilité de D_n . Si $S_n(x)$ est toute du même côté de $F(x)$, on peut, en première approximation, diviser par deux le niveau de signification;

Il existe de même des tables (36) qui donnent la probabilité pour que D_{mn} défini par $D_{mn} = \text{Max } |S_m(x) - T_n(x)|$ soit supérieur à un nombre donné pour deux fonctions de répartition empirique, en fonction des nombres de réalisation m et n . Le test correspondant a été appliqué aux différentes courbes décrites plus haut, qui sont les différentes fonctions de répartition de charges électriques et d'intervalles de temps pour les microdécharges lorsque la résistance de protection de la source haute tension était de 120 mégohms : avec un niveau de signification meilleur que 1% on ne peut en aucun cas dire que ces courbes correspondent à des réalisations d'une même fonction. Ceci confirme que l'on observe une évolution des microdécharges dans le temps précédant l'étincelle, du moins sur les enregistrements qui ont été faits.

IV - APPLICATION DES TESTS AUX RESULTATS OBTENUS AVEC UNE RESISTANCE DE PRO- TECTION DE MEGOHMS .

Pour les expériences réalisées avec une résistance de protection de 3 mégohms, c'est le premier test de Kolmogorov qui est appliqué. Cependant les courbes expérimentales sur lesquelles on applique le test sont déjà des transformations à partir de fonctions de répartition expérimentales et non de fonction de répartition vraies. Aussi faudra-t-il pondérer les niveaux de signification obtenus, d'autant que le nombre de réalisations n'est pas trop élevé. En fait, nous nous rapprochons un peu plus de la réalité en considérant la droite bissectrice, non pas comme une courbe certaine mais comme une courbe empirique réalisée à partir de 64 épreuves. Dans ce cas, si on applique le second test de Kolmogorov, à un niveau de signification donné, l'écart maximum permis entre les courbes est multiplié par 1, 2, 3, par rapport au premier test (pour le nombre de points que nous utilisons).

Dans les conditions expérimentales déjà citées et pour le nombre d'étincelles sur lesquelles nous avons faits les tests nous obtenons les résultats suivants :

- 1) L'intervalle de temps séparant l'étincelle de la dernière microdécharge est comparable avec ceux séparant les autres microdécharges avant l'étincelle.
- 2) La quantité d'électricité transportée par la dernière microdécharge avant l'étincelle apparaît plus élevée que pour les autres, avec un niveau de signification de 1% (5% avec le 2° test)
- 3) L'intervalle de temps séparant les deux dernières microdécharges apparaît plus court que les autres avec un niveau de signification de 0,1% (1% avec le 2° test)
- 4) Les 4 autres intervalles de temps et les 5 décharges transportées par les dernières microdécharges précédant celles déjà mentionnées ne se distinguent pas de l'ensemble des autres microdécharges.

Le premier résultat semble intéressant à analyser pour le choix de différentes hypothèses liant ou non les microdécharges.

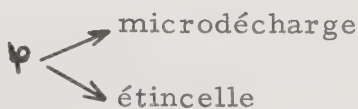
aux étincelles. En effet, dans un régime d'étincelles en présence de microdécharges on peut formuler les trois hypothèses suivantes :

- soit, il existe un phénomène physique qui est à l'origine des microdécharges, elles-mêmes se transformant en étincelles.

- soit, il existe un même phénomène qui initie soit les microdécharges, soit les étincelles suivant les conditions du moment.

- soit, il existe deux phénomènes bien distincts qui initient indépendamment les microdécharges ou les étincelles. Ces hypothèses peuvent être résumées dans le diagramme suivant :

Hypothèse I : phénomène $\varphi \longrightarrow$ microdécharge $\longrightarrow$ étincelle

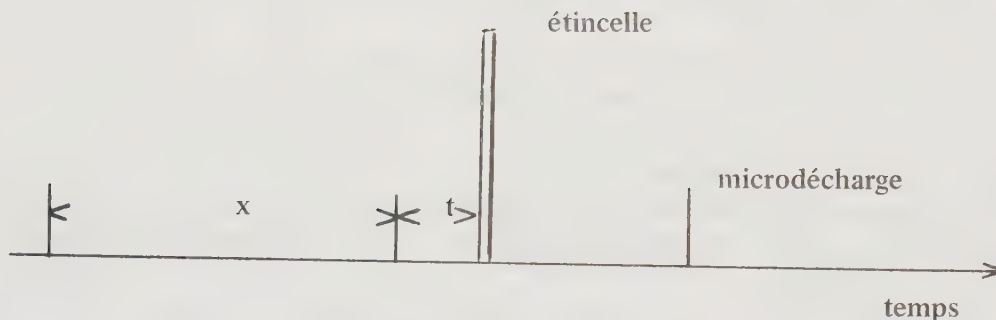
Hypothèse II : phénomène φ 

Hypothèse III : phénomène $\varphi_1 \longrightarrow$ microdécharge
 phénomène $\varphi_2 \longrightarrow$ étincelle

D'après les observations photographiques du signal électrique précédant l'étincelle, l'hypothèse I n'est pas à retenir : dans les limites des performances de l'appareillage décrit dans la deuxième partie, le début de l'étincelle est différent de la forme du signal électrique des microdécharges.

L'hypothèse II, implique que la répartition des intervalles de temps entre une étincelle et la microdécharge qui la précède, soit la même que celle des intervalles de temps séparant les microdécharges : c'est la répartition des intervalles de temps séparant le phénomène.

Dans le cas de l'hypothèse III on peut exprimer la loi de probabilité pour l'intervalle de temps séparant une étincelle de la microdécharge qui la précède à partir de celle connue pour les intervalles de temps séparant les microdécharges :



- Figure 19 -

Soit $f(x)$ la densité de probabilité de la variable aléatoire X , intervalle de temps séparant deux microdécharges. On se propose de calculer la densité de probabilité $g(t)$ de la variable aléatoire T , intervalle de temps séparant une étincelle de la microdécharge qui la précède. On suppose, dans le cas de l'hypothèse III, que l'apparition d'une étincelle est indépendante de l'apparition des microdécharges.

Par conséquent pour x connu, T est uniformément réparti sur l'intervalle $[0, x]$;

$h_x(t) dt = \frac{dt}{x}$ est la probabilité pour que l'étincelle apparaisse entre les instants t et $t + dt$ à partir d'une microdécharge. Conditionnellement au fait que la microdécharge suivante apparaîtrait à l'instant x ,

La probabilité à priori de l'apparition de l'étincelle entre les instants t et $t + dt$ devient :

$$\begin{aligned} p(t, x) dt dx &= h_x(t) dt \cdot f(x) dx \\ &= \frac{f(x)}{x} dt dx \text{ pour } 0 \leq t \leq x. \end{aligned}$$

La probabilité $g(t) dt$ est la somme pour tous les x des probabilités à priori de $p(t, x) dt dx$.

La densité de probabilité de T peut donc s'écrire :

$$g(t) = \int_t^{\infty} \frac{f(x)}{x} dx \quad (\text{car } x \geq t)$$

On vérifie facilement que $g(t)$ est une densité de probabilité :

- d'une part, $g(t)$ est positive car t et $f(x)$ sont positifs.

- d'autre part on a :

$$g'(t) = \frac{dg(t)}{dt} = - \frac{f(t)}{t} \quad \text{soit } f(t) = -t g'(t)$$

$f(t)$ est une densité de probabilité, donc

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

$$\text{soit } - \int_0^{\infty} t g'(t) dt = 1$$

$$\text{mais } - \int_0^{\infty} t g'(t) dt = - \left[t g(t) \right]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} g(t) dt$$

Puisque, $f(t)$ est intégrable, elle décroît plus vite à partir d'une certaine valeur de t_0 , que $1/t^{\alpha}$, $\alpha > 1$. Ceci entraîne que $\left[t g(t) \right]_0^{\infty} = 0$.

Par conséquent on a bien aussi pour $g(t)$:

$$\int_0^{\infty} g(t) dt = 1$$

Il est intuitif d'autre part que la probabilité $P[T \leq a]$ est plus grande que la probabilité $Q[X \leq a]$. On peut le vérifier en considérant les fonctions de répartition $F(a)$ et $G(a)$.

$$\begin{aligned} \text{On a : } F(a) &= \int_0^a f(x) dx \\ &= - \int_0^a t g'(t) dt \end{aligned}$$

$$F(a) = - \left[t g(t) \right]_0^a + \int_0^a g(t) dt$$

$$= - a \cdot g(a) + G(a)$$

a étant positif ou nul on a bien :

$$G(a) \gg F(a)$$

Il est intéressant aussi, pour avoir des éléments de comparaison, de connaître la courbe représentant la fonction de répartition $H(z)$ de la variable aléatoire $Z = F(T)$. On a :

$$H(z) = P[Z \leq z]$$

$$= P[F(T) \leq z]$$

F est une fonction monotone non décroissante.

Si elle admet une fonction inverse F^{-1} on a :

$$H(z) = P[T \leq F^{-1}(z)]$$

$$= G(F^{-1}(z))$$

Si on connaît $F(x)$ on peut tracer la courbe $H(z)$ en fonction de z .

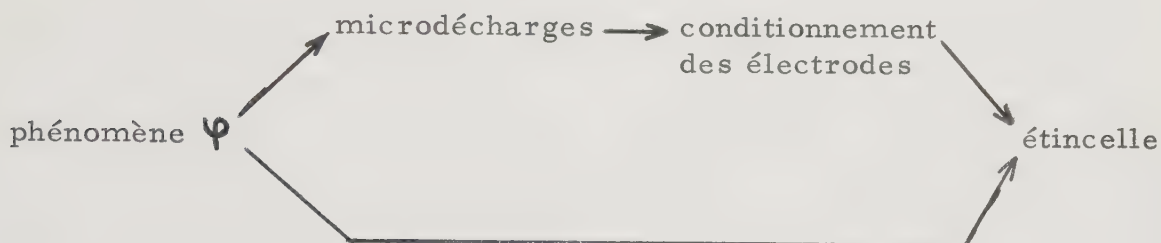
Pour les intervalles de temps séparant les microdécharges on peut admettre en première approximation que $f(x) = a e^{-ax} (2)$.

La courbe $H(z)$ a été tracée dans ce cas et aussi dans le cas où $f(x) = a^2 x e^{-ax}$ (V. Figure 16). Le test de Kolmogorov appliqué, dans l'hypothèse où l'apparition des étincelles serait indépendante des microdécharges a été négatif avec un niveau de signification de 0, 1 %.

Ainsi il ne serait pas impossible que, avec les étincelles sur lesquelles on a effectué ce test, et dans les limites des performances de l'appareillage (en particulier sur les seuils de détection), un même phénomène soit à l'origine des étincelles et des microdécharges.

En outre, au moins à forte résistance de protection, il y a une accélération du régime de microdécharges tant en amplitude qu'en

en charges transportées, juste avant l'étincelle. Ceci porterait à croire que les microdécharges jouent un rôle dans le conditionnement des électrodes juste avant l'étincelle et l'on pourrait schématiser une hypothèse différente de celles déjà avancées par



On sait (31), (32), (33), qu'au cours d'une microdécharge il y a échange de particules lourdes entre les électrodes. Si l'énergie de ces particules lourdes devient importante elles peuvent créer des sites d'émissions d'électrons, à émission plus énergétique aussi (35).

Si on considère le phénomène émission électronique comme phénomène de départ, soit d'une microdécharge, soit d'une étincelle, on voit qu'il n'y a pas de contradiction avec les résultats que nous avons obtenus. D'autre part, le rôle joué par la résistance de protection dans l'apparition des étincelles pourrait s'expliquer ainsi : pour une résistance de protection supérieure à 40 mégohms, il a été observé un régime de microdécharges rapide mais de plus faible énergie que pour une résistance plus petite. Ainsi on pourrait avancer qu'à grande résistance de protection, il ne peut y avoir apparition d'une étincelle que sur une accélération du régime de microdécharge, d'où une fréquence plus faible qu'à faible impédance.

Cependant pour ce dernier paragraphe, nous avons surtout entrevu vers quelles hypothèses nous ont conduit les résultats expérimentaux. Le nombre de résultats demanderait à être augmenté pour

confirmer ces hypothèses et nous avons exposé, à partir de données expérimentales, une méthode de traitement de ces données.

C O N C L U S I O N

CONCLUSION

Ce mémoire a été centré sur l'étude des phénomènes qui peuvent concourir à l'initialisation des étincelles dans un vide industriel, à des distances de 2 à 3 millimètres.

Après avoir rappelé les principales hypothèses pour l'explication de l'initiation, nos travaux ont été dirigés dans deux voies différentes, mais qui se complètent mutuellement :

1) - Nous avons mis au point un appareillage destiné à observer de façon analogique le temps précédant juste l'étincelle. Nous avons fait varier l'intervalle de temps d'observation, juste avant l'étincelle, de 100 nanosecondes à 1,5 milliseconde en passant par 0,5 ; 5 ; 500 microsecondes et en fonction de cela, les performances de l'ensemble ont été les suivants :

- Pour une observation pendant 100 nanosecondes avant l'étincelle :
 - * temps de montée de l'appareillage : 4 nanosecondes
 - * courant minimum détectable : 2 microampères
- Pour une observation pendant 1,5 millisecondes avant l'étincelle :
 - * temps de montée de l'appareillage : 100 microsecondes
 - * courant minimum détectable : 0,1 microampère.

Afin d'établir les performances de cet appareillage, nous avons fait une étude préalable sur la forme du courant transporté par l'étincelle. Dans les conditions expérimentales exposées, c'est un courant de valeur crête variant de 5 à 15 ampères avec un temps de montée de 50 nanosecondes environ et un temps de descente du même ordre de grandeur.

Les résultats de ce premier travail ont été les suivants : aucune variation de courant supérieur à 2 microampères (et même jusqu'à 0,1 microampère suivant les temps d'observation) n'a été décelée dans l'intervalle de temps de 1,5 milliseconde précédant l'étincelle si ce n'est celles dûes aux microdécharges ; la présence de celles-ci s'explique en fonction des conditions expérimentales que nous avons exposées (1).

2) - Nous avons connecté un ordinateur en temps réel à nos expériences pour une étude statistique de l'évolution des données relatives aux microdécharges dans le temps précédant l'étincelle. Ceci a nécessité une connaissance approfondie de ce ordinateur type PDP 8/S de "Digital Equipment" pour réaliser et mettre au point un ensemble, pour coder sous forme digitale les données physiques relatives aux microdécharges et aux étincelles afin de les faire admettre par le ordinateur. Par l'intermédiaire d'un programme adapté pour l'expérience, l'ensemble permet d'étudier statistiquement les données suivantes dans le temps précédant l'étincelle :

- l'intervalle de temps séparant une étincelle de la microdécharge qui la précède
- les intervalles de temps séparant les microdécharges précédant juste l'étincelle
- les quantités de courant transportées par ces mêmes microdécharges.

Ces études portent sur 1280 microdécharges au maximum et le temps d'emménagement relatif à chaque microdécharge est inférieur à 700 microsecondes ce qui constitue un temps inférieur à celui de l'observation analogique.

Avec cet ensemble et avec une méthode de traitement appropriée, nous avons obtenu les résultats suivants :

* un accroissement important du courant moyen transporté par les microdécharges juste avant l'étincelle et ceci lorsque l'espace interélectrode est protégé par une résistance de 120 mégohms

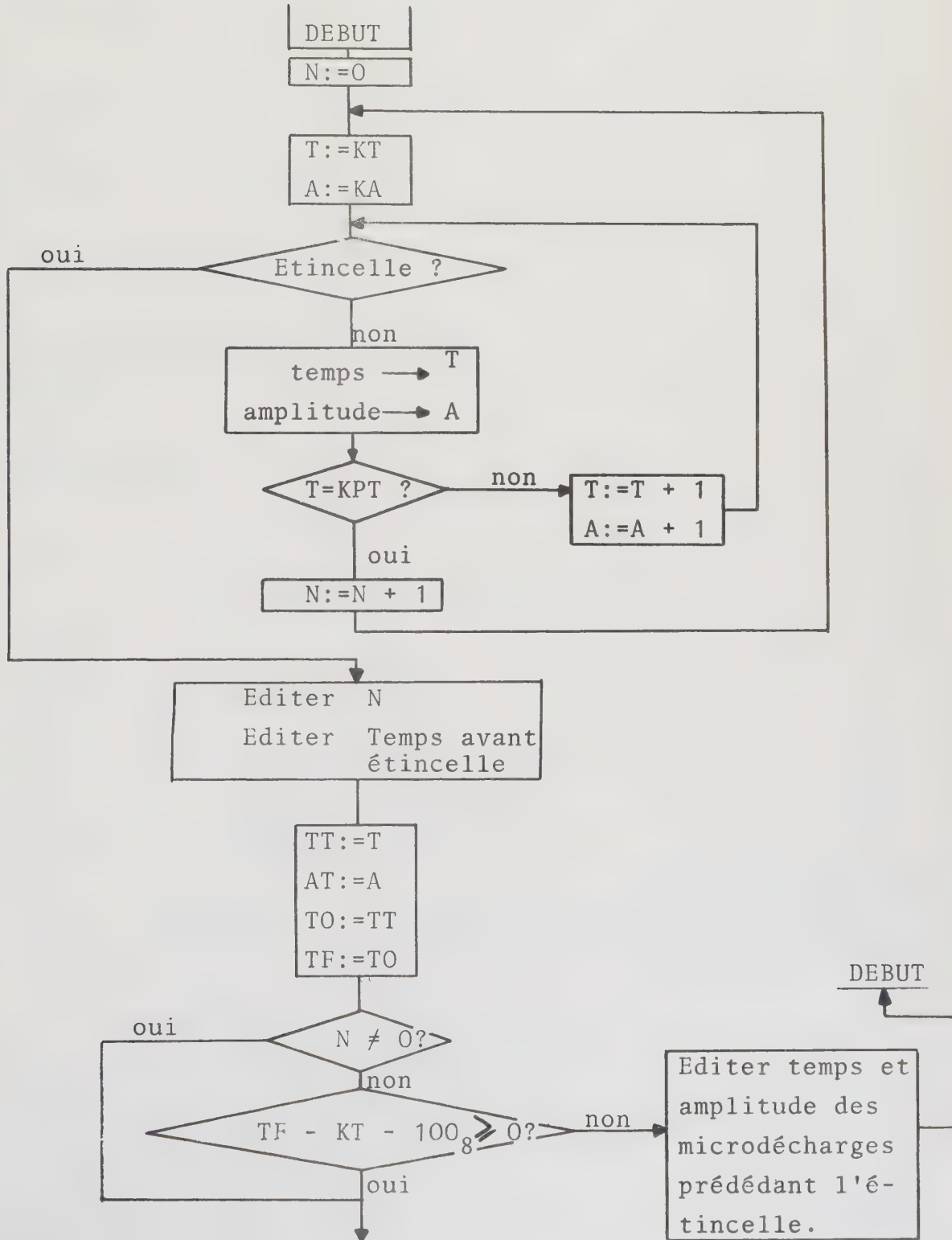
* pour une résistance de protection de 3 mégohms, la charge transportée par la dernière microdécharge est statistiquement plus importante que celle des autres et l'intervalle de temps qui sépare l'étincelle de cette microdécharge est comparable à celui séparant les microdécharges.

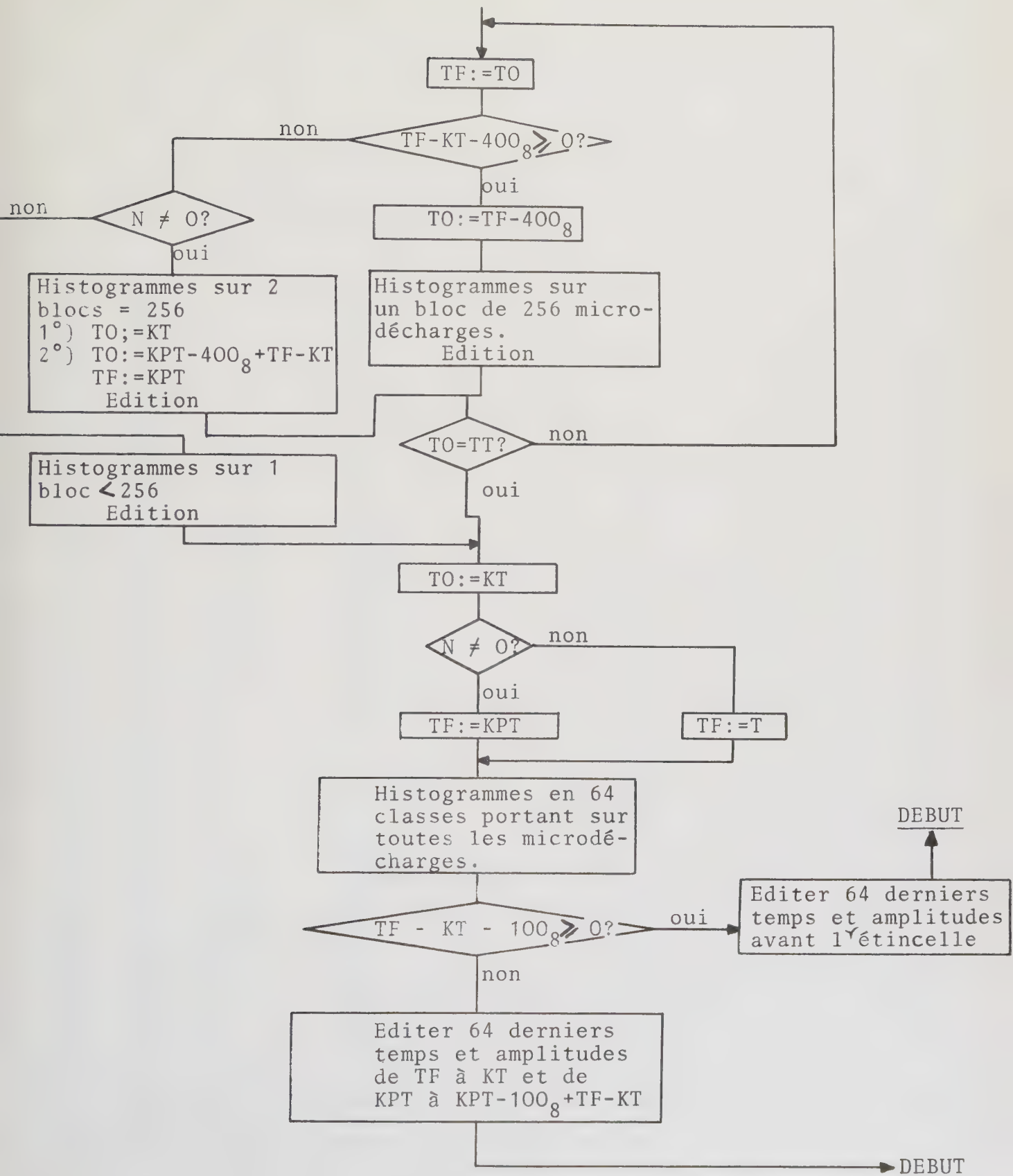
Bien que le nombre d'expériences sur lesquelles ont été obtenus ces résultats soit limité, nous pouvons entrevoir un mécanisme de formation des étincelles dans un régime de microdécharges : un même phénomène initierait les microdécharges et les étincelles, mais celles-ci prendraient naissance seulement après une augmentation moyenne de l'énergie transportée par les microdécharges, énergie peut-être suffisante pour conditionner la surface des électrodes.

- 33 - V. S. SCHWABE Z. Angew. Phys, 12, 1960, p. 244
- 34 - M. G. KENDALL "The advanced theory of statistics"
A. STUART Ch. Griffing & Comp. Ltd London, vol 2,
1967, p. 453
- 35 - L. I. PIVOVAR Sov. Phys. Tech. Phys., 3, 1958, p. 2101
V. I. GORDIENKO
- 36 - "Handbook of tables for probability and
statistics" Ed. W. H. BEYER, ph. D.
The chemical Rubber co' Cleveland OH 10
1966, p. 321
- 37 - J. FAVREL Proc. 3d Int. Symp on Electr. and Elect.
P. BOUVIER Insulation in Vacuum, Paris (à paraître
en 1968) .

ANNEXE :

I - ORGANIGRAMME DU PROGRAMME





II- PROGRAMME EN LANGAGE MACHINE (MACRO-8) : LISTAGE

/PROGRAMME DE STATISTIQUES
/MICRODECHARGES & ETINCELLES
/

*30

/TABLE DES ETIQUETTES

0030	0000	N,	0
0031	2000	KT,	2000
0032	0000	T,	0
0033	4400	KA,	4400
0034	0000	A,	0
0035	0000	TC,	0
0036	0000	AC,	0
0037	3401	MKPT,	-4377
0040	3777	TMS,	3777
0041	0000	TAE,	0
0042	7217	TYCR,	7217
0043	2401	TAC,	2401
0044	7205	TY2,	7205
0045	0575	EEG,	0575
0046	7234	TYTB,	7234
0047	7072	DECP,	7072
0050	1675	NEG,	1675
0051	6000	MKT,	-2000
0052	1617	NO,	1617
0053	1511	MI,	1511
0054	0000	TO,	0
0055	0000	AO,	0
0056	0000	TF,	0
0057	0000	AF,	0
0060	7400	MQC,	-400
0061	4400	KPT,	4400
0062	2400	TRM,	2400
0063	0455	AST1,	455
0064	0633	AST2,	633
0065	0000	KQT,	0
0066	0000	KQA,	0
0067	0661	AST3,	661
0070	0400	LU,	400
0071	7700	MX,	-100
0072	0000	KRT,	0
0073	0000	KRA,	0
0074	1000	AED1,	1000
0075	1023	AED2,	1023
0076	0200	ACOM,	200

0077	1400	FA,	1400
0100	0000	FAP,	0
0101	6001	FB,	-1777
0102	0000	ORT,	0
0103	0000	ORA,	0
0104	0000	EXA,	0
0105	7761	MIT,	-17
0106	0017	PIT,	17
0107	0000	TA,	0
0110	1500	TRU,	1500
0111	0000	TAP,	0
0112	0000	AA,	0
0113	1400	ARU,	1400
0114	0000	AAP,	0
0115	0014	MASK,	14
0116	1600	TATRU,	1600
0117	0000	TATP,	0
0120	1700	TATRA,	1700
0121	0000	TATA,	0
0122	0600	AIMPR,	600
0123	6361	ARUP,	-1417
0124	6261	TRUP,	-1517
0125	6161	TATRUP,	-1617
0126	6061	TATRAP,	-1717
0127	1121	AIMP2,	1121
0130	0000	COA,	0
0131	0000	FIA,	0
0132	7000	KPA,	7000
0133	0000	RANG,	0
0134	7770	NN,	-10
0135	0000	NNT,	0
0136	0275	EGAL,	275
0137	0000	AAQ,	0
0140	7701	MZX,	-77
0141	0077	PZX,	77
0142	0070	MAS2,	70
0143	6301	ARUX,	-1477
0144	6201	TRUX,	-1577
0145	6101	TATRUX,	-1677
0146	6001	TATRAX,	-1777
0147	0675	ASYN2,	675
/			
/PROGRAMME PRINCIPAL			
/			
*200			
/ENREGISTREMENT			
0200	7300	COM,	CLA CLL
0201	3030		DCA N
0202	6102		IOT 102
0203	6112		IOT 112
0204	1031		TAD KT

0205	3032		DCA T	
0206	1033		TAD KA	
0207	3034		DCA A	
0210	6104	DEB,	IOT 104	
0211	5210		JMP .-1	
0212	6103		IOT 103	
0213	7000		NOP	
0214	3035		DCA TC	
0215	6113		IOT 113	
0216	3036		DCA AC	
0217	1035		TAD TC	
0220	7510		SPA	/E?
0221	5236		JMP ETIN	
0222	3432		DCA I T	
0223	1036		TAD AC	
0224	3434		DCA I A	
0225	1032		TAD T	
0226	1037		TAD MKPT	
0227	7700		SMA CLA	
0230	5234		JMP .+4	
0231	2032		ISZ T	
0232	2034		ISZ A	
0233	5210		JMP DEB	
0234	2030		ISZ N	
0235	5204		JMP DEB-4	
0236	0040	ETIN,	AND TMS	/OUI
0237	3041		DCA TAE	
0240	4442		JMS I TYCR	
0241	1043		TAD TAC	
0242	4444		JMS I TY2	
0243	1045		TAD EEG	
0244	4444		JMS I TY2	/TAE=
0245	4446		JMS I TYTB	
0246	1041		TAD TAE	
0247	4447		JMS I DECP	
0250	4446		JMS I TYTB	
0251	4442		JMS I TYCR	
0252	1050		TAD NEG	
0253	4444		JMS I TY2	/N=
0254	4446		JMS I TYTB	
0255	1030		TAD N	
0256	4447		JMS I DECP	
0257	4446		JMS I TYTB	
0260	4442		JMS I TYCR	
0261	1030		TAD N	
0262	7640		SZA CLA	
0263	5277		JMP MICR	
0264	1032		TAD T	
0265	1051		TAD MKT	
0266	7640		SZA CLA	/M?

0267	5277		JMP MICR	
0270	1052		TAD NO	
0271	4444		JMS I TY2	
0272	1053		TAD MI	
0273	4444		JMS I TY2	/NOMI
0274	4446		JMS I TYTB	
0275	4442		JMS I TYCR	
0276	5200		JMP COM	
0277	1032	MICR,	TAD T	
0300	3054		DCA TO	/EDITIONS
0301	1034		TAD A	
0302	3055		DCA AO	
0303	1054		TAD TO	
0304	3056		DCA TF	
0305	1055		TAD AO	
0306	3057		DCA AF	
0307	1056		TAD TF	
0310	1060		TAD MQC	
0311	1051		TAD MKT	
0312	7710		SPA CLA	/TF-KT-400>=0?
0313	5323		JMP SUITE	
0314	1056		TAD TF	
0315	1060		TAD MQC	
0316	3054		DCA TO	
0317	1057		TAD AF	
0320	1060		TAD MQC	
0321	3055		DCA AO	
0322	5346		JMP LE	
0323	1030	SUITE,	TAD N	
0324	7650		SNA CLA	/N=0?
0325	5363		JMP RU	
0326	1061		TAD KPT	
0327	1060		TAD MQC	
0330	1056		TAD TF	
0331	1051		TAD MKT	
0332	3054		DCA TO	
0333	1054		TAD TO	
0334	1062		TAD TRM	
0335	3055		DCA AO	
0336	1056		TAD TF	
0337	1051		TAD MKT	
0340	7640		SZA CLA	/TF=KT?
0341	5350		JMP UA	
0342	1061		TAD KPT	
0343	3056		DCA TF	
0344	1132		TAD KPA	
0345	3057		DCA AF	
0346	4463	LE,	JMS I AST1	/S.P.STA. BLOC DE 400
0347	5351		JMP .+2	
0350	4464	UA,	JMS I AST2	/S.P.STA. 2 BLOCS 400
0351	1032		TAD T	
0352	7041		CIA	

0353	1054		TAD TO	
0354	7640		SZA CLA	/TO=T?
0355	5303		JMP MICR+4	
0356	7000		NOP	
0357	7240		STA	
0360	1132		TAD KPA	
0361	3066		DCA KQA	
0362	5376		JMP LI	
0363	1031	RU,	TAD KT	
0364	3054		DCA TO	
0365	1033		TAD KA	
0366	3055		DCA AO	
0367	4463		JMS I AST1	/S.P.STA.BLOC<400
0370	5771		JMP I CK	
0371	0761	CK,	761	
0372	7000		NOP	
0373	7240		STA	
0374	1034		TAD A	
0375	3066		DCA KQA	
0376	4467	LI,	JMS I AST3	/S.P. STA. GLOBAL
0377	5470		JMP I LU	

/

*400

/ED. 64 DERNIERS TPS & AMP.

0400	1032		TAD T	
0401	1051		TAD MKT	
0402	1071		TAD MX	
0403	7710		SPA CLA	/T-KT-X>=0?
0404	5214		JMP .+10	
0405	1032		TAD T	
0406	1071		TAD MX	
0407	3072		DCA KRT	
0410	1034		TAD A	
0411	1071		TAD MX	
0412	3073		DCA KRA	
0413	5246		JMP LV	/ED.
0414	1030		TAD N	
0415	7640		SZA CLA	
0416	5224		JMP .+6	
0417	1031		TAD KT	
0420	3072		DCA KRT	
0421	1033		TAD KA	
0422	3073		DCA KRA	
0423	5246		JMP LV	/ED,
0424	1061		TAD KPT	
0425	1071		TAD MX	
0426	1032		TAD T	
0427	1051		TAD MKT	
0430	3072		DCA KRT	
0431	1072		TAD KRT	
0432	1062		TAD TRM	

0433	7000		NOP	
0434	7000		NOP	
0435	3073		DCA KRA	
0436	1051		TAD MKT	
0437	1032		TAD T	
0440	7640		SZA CLA	
0441	5250		JMP .+7	
0442	1061		TAD KPT	
0443	3032		DCA T	
0444	1132		TAD KPA	
0445	3034		DCA A	
0446	4474	LV,	JMS I AED1	/ED. 1 BLOC
0447	5251		JMP .+2	
0450	4475		JMS I AED2	/ED. 2 BLOCS
0451	4442		JMS I TYCR	
0452	4442		JMS I TYCR	
0453	4442		JMS I TYCR	
0454	5476		JMP I ACOM	
0455	0000	ST1,	Ø	/STA 1 BLOC& ED.
0456	4272		JMS RAZ	/RAZ
0457	1054		TAD TO	
0460	3102		DCA ORT	
0461	1055		TAD AO	
0462	3103		DCA ORA	
0463	7240		STA	
0464	1057		TAD AF	
0465	7041		CIA	
0466	3104		DCA EXA	
0467	4305		JMS SYN	
0470	4522		JMS I AIMPR	
0471	5655		JMP I ST1	
0472	0000	RAZ,	Ø	/RAZ
0473	7300		CLA CLL	
0474	1077		TAD FA	
0475	3100		DCA FAP	
0476	3500		DCA I FAP	
0477	1100		TAD FAP	
0500	1101		TAD FB	
0501	7700		SMA CLA	
0502	5672		JMP I RAZ	
0503	2100		ISZ FAP	
0504	5276		JMP .-6	
0505	0000	SYN,	Ø	/STA. 1 BLOC
0506	1503		TAD I ORA	
0507	7110		CLL RAR	
0510	7110		CLL RAR	
0511	7000		NOP	
0512	1105		TAD MIT	
0513	7500		SMA	
0514	7200		CLA	
0515	1106		TAD PIT	/SAT.

0516	3112	DCA AA	
0517	1112	TAD AA	
0520	1113	TAD ARU	
0521	3114	DCA AAP	
0522	2514	ISZ I AAP	
0523	1502	TAD I ORT	
0524	7110	CLL RAR	
0525	7110	CLL RAR	
0526	7110	CLL RAR	
0527	7110	CLL RAR	
0530	7110	CLL RAR	
0531	7110	CLL RAR	
0532	7110	CLL RAR	
0533	1105	TAD MIT	
0534	7500	SMA	
0535	7200	CLA	
0536	1106	TAD PIT	/SAT.
0537	3107	DCA TA	
0540	1107	TAD TA	
0541	1110	TAD TRU	
0542	3111	DCA TAP	
0543	2511	ISZ I TAP	/TPS
0544	1107	TAD TA	
0545	7110	CLL RAR	
0546	7110	CLL RAR	
0547	7000	NOP	
0550	3027	DCA TAT	
0551	1112	TAD AA	
0552	0115	AND MASK	
0553	1027	TAD TAT	
0554	1116	TAD TATRU	
0555	3117	DCA TATP	
0556	2517	ISZ I TATP	/A.TAV
0557	1137	TAD AAQ	
0560	0115	AND MASK	
0561	1027	TAD TAT	
0562	1120	TAD TATRA	
0563	3121	DCA TATA	
0564	2521	ISZ I TATA	/A.TAP
0565	1112	TAD AA	
0566	3137	DCA AAQ	
0567	1103	TAD ORA	
0570	1104	TAD EXA	
0571	7700	SMA CLA	
0572	5705	JMP I SYN	
0573	2102	ISZ ORT	
0574	2103	ISZ ORA	
0575	5306	JMP SYN+1	

/

*600

/IMPRESSION STA. PARTIELLE

0600	0000	IMPR,	Ø	
0601	4442		JMS I TYCR	
0602	1113		TAD ARU	
0603	3020		DCA 20	
0604	1123		TAD ARUP	
0605	3021		DCA 21	
0606	4425		JMS I DEDIT	
0607	4442		JMS I TYCR	
0610	1110		TAD TRU	
0611	3020		DCA 20	
0612	1124		TAD TRUP	
0613	3021		DCA 21	
0614	4425		JMS I DEDIT	
0615	4442		JMS I TYCR	/TPS
0616	1116		TAD TATRU	
0617	3021		DCA 21	
0620	4425		JMS I DEDIT	/A.TAV
0621	4442		JMS I TYCR	
0622	1120		TAD TATRA	
0623	3020		DCA 20	
0624	1126		TAD TATRAP	
0625	3021		DCA 21	
0626	4425		JMS I DEDIT	/A.TAP
0627	4442		JMS I TYCR	
0630	5600		JMP I IMPR	
0631	0000	ST2,	Ø	/STA. 2 BLOCS
0632	4374		JMS ARAZ	
0633	1054		TAD TO	
0634	3102		DCA ORT	
0635	1055		TAD AO	
0636	3103		DCA ORA	
0637	7240		STA	
0640	1132		TAD KPA	
0641	7041		CIA	
0642	3104		DCA EXA	
0643	4773		JMS I ASYN	
0644	1031		TAD KT	
0645	3102		DCA ORT	
0646	1033		TAD KA	
0647	3103		DCA ORA	
0650	7240		STA	
0651	1057		TAD AF	
0652	7041		CIA	
0653	3104		DCA EXA	
0654	4773		JMS I ASYN	
0655	4200		JMS IMPR	
0656	5631		JMP I ST2	
0657	0000	ST3,	Ø	/STA. 1 BLOC<400
0660	4374		JMS ARAZ	
0661	1033		TAD KA	
0662	3103		DCA ORA	
0663	1031		TAD KT	

0664	3102	DCA	ORT	
0665	1066	TAD	KQA	
0666	7041	CIA		
0667	3104	DCA	EXA	
0670	4547	JMS	I ASYN2	
0671	4527	JMS	I AIMP2	
0672	5657	JMP	I ST3	
0673	0000	SYN2,	Ø	/STA. GLOBALE
0674	1503	TAD	I ORA	
0675	7000	NOP		
0676	1140	TAD	MZX	
0677	7500	SMA		
0700	7200	CLA		
0701	1141	TAD	PZX	/SAT
0702	3112	DCA	AA	
0703	1112	TAD	AA	
0704	1113	TAD	ARU	
0705	3114	DCA	AAP	
0706	2514	ISZ	I AAP	/AMP.
0707	1502	TAD	I ORT	
0710	7110	CLL	RAR	
0711	7110	CLL	RAR	
0712	7110	CLL	RAR	
0713	7110	CLL	RAR	
0714	7110	CLL	RAR	
0715	1140	TAD	MZX	
0716	7500	SMA		
0717	7200	CLA		
0720	1141	TAD	PZX	/SAT.
0721	3107	DCA	TA	
0722	1107	TAD	TA	
0723	1110	TAD	TRU	
0724	3111	DCA	TAP	
0725	2511	ISZ	I TAP	/TPS
0726	1107	TAD	TA	
0727	7110	CLL	RAR	
0730	7110	CLL	RAR	
0731	7110	CLL	RAR	
0732	3027	DCA	TAT	
0733	1112	TAD	AA	
0734	0142	AND	MAS2	
0735	1027	TAD	TAT	
0736	1116	TAD	TATRU	
0737	3117	DCA	TATP	
0740	2517	ISZ	I TATP	/A, TAV
0741	1137	TAD	AAQ	
0742	0142	AND	MAS2	
0743	1027	TAD	TAT	
0744	1120	TAD	TATRA	
0745	3121	DCA	TATA	
0746	2521	ISZ	I TATA	/A. TAP

0747	1112		TAD AA
0750	3137		DCA AAQ
0751	1103		TAD ORA
0752	1104		TAD EXA
0753	7700		SMA CLA
0754	5673		JMP I SYN2
0755	2102		ISZ ORT
0756	2103		ISZ ORA
0757	5274		JMP SYN2+1
0760	1032		TAD T
0761	1051		TAD MKT
0762	1071		TAD MX
0763	7710		SPA CLA
0764	5771		JMP I RCKT
0765	7240		STA
0766	1032		TAD T
0767	3061		DCA KPT
0770	5772		JMP I RCK
0771	0417	RCKT,	417
0772	0373	RCK,	373
0773	0505	ASYN,	505
0774	0472	ARAZ,	472

/

*1000

1000	0000	ED1,	0
1001	4442		JMS I TYCR
1002	7240		STA
1003	1034		TAD A
1004	3130		DCA COA
1005	1073		TAD KRA
1006	7041		CIA
1007	3131		DCA FIA
1010	4264		JMS REDI
1011	4442		JMS I TYCR
1012	7240		STA
1013	1032		TAD T
1014	3130		DCA COA
1015	1072		TAD KRT
1016	7041		CIA
1017	3131		DCA FIA
1020	4264		JMS REDI
1021	4442		JMS I TYCR
1022	5600		JMP I ED1

ED2,

1023	0000		0
1024	4442		JMS I TYCR
1025	7240		STA
1026	1034		TAD A
1027	3130		DCA COA
1030	1033		TAD KA
1031	7041		CIA
1032	3131		DCA FIA

/EDITION EN UN BLOC

/EDITION DE DEUX BLOCS

1033	4264		JMS REDI	
1034	7240		STA	
1035	1132		TAD KPA	
1036	3130		DCA COA	
1037	1073		TAD KRA	
1040	7041		CIA	
1041	3131		DCA FIA	
1042	4264		JMS REDI	
1043	4442		JMS I TYCR	
1044	7240		STA	
1045	1032		TAD T	
1046	3130		DCA COA	
1047	1031		TAD KT	
1050	7041		CIA	
1051	3131		DCA FIA	
1052	4264		JMS REDI	
1053	7240		STA	
1054	1061		TAD KPT	
1055	3130		DCA COA	
1056	1072		TAD KRT	
1057	7041		CIA	
1060	3131		DCA FIA	
1061	4264		JMS REDI	
1062	4442		JMS I TYCR	
1063	5623		JMP I ED2	
1064	0000	REDI,	Ø	/IMPRESSION
1065	7200		CLA	
1066	1130		TAD COA	
1067	3133		DCA RANG	
1070	1134	DEBU,	TAD NN	
1071	3135		DCA NNT	
1072	1130		TAD COA	
1073	7041		CIA	
1074	1133		TAD RANG	
1075	4447		JMS I DECP	
1076	1136		TAD EGAL	
1077	4426		JMS I TYPE	
1100	4446		JMS I TYTB	
1101	4446		JMS I TYTB	
1102	1533	CONTI,	TAD I RANG	
1103	4447		JMS I DECP	
1104	4446		JMS I TYTB	
1105	1133		TAD RANG	
1106	1131		TAD FIA	
1107	7710		SPA CLA	
1110	5320		JMP .+10	
1111	7240		STA	
1112	1133		TAD RANG	
1113	3133		DCA RANG	
1114	2135		ISZ NNT	
1115	5302		JMP CONTI	

1116	4442		JMS I TYCR	
1117	5270		JMP DEBU	
1120	5664		JMP I REDI	
1121	0000	IMP2,	Ø	/IMPRESSION EN DEUX BLOCS
1122	4442		JMS I TYCR	
1123	1113		TAD ARU	
1124	3020		DCA 20	
1125	1143		TAD ARUX	
1126	3021		DCA 21	
1127	4425		JMS I DEDIT	
1130	4442		JMS I TYCR	
1131	1110		TAD TRU	
1132	3020		DCA 20	
1133	1144		TAD TRUX	
1134	3021		DCA 21	
1135	4425		JMS I DEDIT	
1136	4442		JMS I TYCR	
1137	1116		TAD TATRU	
1140	3020		DCA 20	
1141	1145		TAD TATRUX	
1142	3021		DCA 21	
1143	4425		JMS I DEDIT	
1144	4442		JMS I TYCR	
1145	1120		TAD TATRA	
1146	3020		DCA 20	
1147	1146		TAD TATRAX	
1150	3021		DCA 21	
1151	4425		JMS I DEDIT	
1152	4442		JMS I TYCR	
1153	5721		JMP I IMP2	
		*25		
0025	7000	DEDIT,	7000	
0026	7200	TYPE,	7200	
0027	0000	TAT,	Ø	

A	0034
AA	0112
AAP	0114
AAQ	0137
AC	0036
ACOM	0076
AED1	0074
AED2	0075
AF	0057
AIMPR	0122
AIMP2	0127
AO	0055

ARAZ	0774
ARU	0113
ARUP	0123
ARUX	0143
AST1	0063
AST2	0064
AST3	0067
ASYN	0773
ASYN2	0147
CK	0371
COA	0130
COM	0200
CONTI	1102
DEB	0210
DEBU	1070
DECP	0047
DEDIT	0025
ED1	1000
ED2	1023
EEG	0045
EGAL	0136
ETIN	0236
EXA	0104
FA	0077
FAP	0100
FB	0101
FIA	0131
IMPR	0600
IMP2	1121
KA	0033
KPA	0132
KPT	0061
KQA	0066
KQT	0065
KRA	0073
KRT	0072
KT	0031
LE	0346
LI	0376
LU	0070
LV	0446
MASK	0115
MAS2	0142
MI	0053
MICR	0277
MIT	0105
MKPT	0037
MKT	0051
MQC	0060
MX	0071
MZX	0140

N	0030
NEG	0050
NN	0134
NNT	0135
NO	0052
ORA	0103
ORT	0102
PIT	0106
PZX	0141
RANG	0133
RAZ	0472
RCK	0772
RCKT	0771
REDI	1064
RU	0363
ST1	0455
ST2	0631
ST3	0657
SUITE	0323
SYN	0505
SYN2	0673
T	0032
TA	0107
TAC	0043
TAE	0041
TAP	0111
TAT	0027
TATA	0121
TATP	0117
TATRA	0120
TATRAP	0126
TATRAX	0146
TATRU	0116
TATRUP	0125
TATRUX	0145
TC	0035
TF	0056
TMS	0040
TO	0054
TRM	0062
TRU	0110
TRUP	0124
TRUX	0144
TYCR	0042
TYPE	0026
TYTB	0046
TY2	0044
UA	0350

/DIFFERENTS PROGRAMMES D'EDITION
/

*20

0020 0000 COM, 0
0021 0000 FIN, 0

/

*7000

/EDITION D'UN TABLEAU

7000	7200	DEDIT,	CLA
7001	1020		TAD COM
7002	3234		DCA CANAL
7003	1236	DEB,	TAD N
7004	3233		DCA NT
7005	1020		TAD COM
7006	7041		CIA
7007	1234		TAD CANAL
7010	4272		JMS DECPRT
7011	1235		TAD EGAL
7012	4772		JMS I ATYPE
7013	4767		JMS I ATYTB
7014	4767		JMS I ATYTB
7015	1634	CONT,	TAD I CANAL
7016	4272		JMS DECPRT
7017	4767		JMS I ATYTB
7020	1234		TAD CANAL
7021	1021		TAD FIN
7022	7700		SMA CLA
7023	5231		JMP .+6
7024	2234		ISZ CANAL
7025	2233		ISZ NT
7026	5215		JMP CONT
7027	4770		JMS I ATYCR
7030	5203		JMP DEB
7031	4770		JMS I ATYCR
7032	5600		JMP I DEDIT
7033	0000	NT,	0
7034	0000	CANAL,	0
7035	0275	EGAL,	275
7036	7770	N,	-10

/

/

*7072

/EDITION DECIMALE
/(DIGITAL EQUIPMENT
/LIBRARY PDP-8)

7072	0000	DECPRT,	0
7073	3327		DCA VALUE
7074	3330		DCA DIGIT
7075	1322		TAD CNTRZA
7076	3331		DCA CNTRZB
7077	1321		TAD ADDRZA

7100	3303		DCA	ARROW	
7101	7410		SKP		
7102	3327		DCA	VALUE	
7103	1323	ARROW,	TAD	TENPWR	
7104	7430		SZL		
7105	2330		ISZ	DIGIT	
7106	7430		SZL		
7107	5300		JMP	ARROW-3	
7110	7200		CLA		
7111	1330		TAD	DIGIT	
7112	4771		JMS	I ATDIG	
7113	7200		CLA		
7114	3330		DCA	DIGIT	
7115	2303		ISZ	ARROW	
7116	2331		ISZ	CNTRZB	
7117	5302		JMP	ARROW-1	
7120	5672		JMP	I DECPRT	
7121	1323	ADDRZA,	TAD	TENPWR	
7122	7774	CNTRZA,	-4		
7123	6030	TENPWR,	-1750		
7124	7634		-144		
7125	7766		-12		
7126	7777		-1		
7127	0000	VALUE,	0		
7130	0000	DIGIT,	0		
7131	0000	CNTRZB,	0		
		*7167			
7167	7234	ATYTB,	7234		
7170	7217	ATYCR,	7217		
7171	7245	ATDIG,	7245		
7172	7200	ATYPE,	7200		
		/			
		/PDP-8 TELETYPE OUTPUT PACKAGE			
		/PDP-8 LIBRARY			
		*7200			
7200	0000	TYPE,	0		
7201	0301		AND	TTAB+1	/1CAR
7202	4260		JMS	CON	
7203	4266		JMS	OTY	
7204	5600		JMP	I TYPE	
7205	0000	TY2,	0		/2 CAR.
7206	3276		DCA	TEMY	
7207	1276		TAD	TEMY	
7210	7012		RTR		
7211	7012		RTR		
7212	7012		RTR		
7213	4200		JMS	TYPE	
7214	1276		TAD	TEMY	
7215	4200		JMS	TYPE	
7216	5605		JMP	I TY2	
7217	0000	TYCR,	0		/RETOUR CHARIOT

7220	7200		CLA	
7221	1302		TAD TTAB+2	
7222	4266		JMS OTY	
7223	1303		TAD TTAB+3	
7224	4266		JMS OTY	
7225	3277		DCA TBC	
7226	5617		JMP I TYCR	
7227	0000	TYSP,	Ø	/ESPACE
7230	7200		CLA	
7231	1304		TAD TTAB+4	
7232	4266		JMS OTY	
7233	5627		JMP I TYSP	
7234	0000	TYTB,	Ø	/TABULATION
7235	7200		CLA	
7236	1277		TAD TBC	
7237	1300		TAD TTAB	
7240	7500		SMA	
7241	5237		JMP .-2	
7242	3277		DCA TBC	
7243	4227		JMS TYSP	
7244	5243		JMP .-1	
7245	0000	TDIG,	Ø	/1 CHIFFRE
7246	0305		AND TTAB+5	
7247	3276		DCA TEMY	
7250	1276		TAD TEMY	
7251	1306		TAD TTAB+6	
7252	7700		SMA CLA	
7253	5645		JMP I TDIG	
7254	1276		TAD TEMY	
7255	1307		TAD TTAB+7	
7256	4266		JMS OTY	
7257	5645		JMP I TDIG	
7260	0000	CON,	Ø	
7261	1310		TAD TTAB+10	
7262	7510		SPA	
7263	1311		TAD TTAB+11	
7264	1304		TAD TTAB+4	
7265	5660		JMP I CON	
7266	0000	OTY,	Ø	/IMPRESSION
7267	6046		TLS	
7270	6041		TSF	
7271	5270		JMP .-1	
7272	7200		CLA	
7273	2277		ISZ TBC	
7274	5666		JMP I OTY	
7275	5634		JMP I TYTB	
7276	0000	TEMY,	Ø	
7277	0000	TBC,	Ø	
7300	7772	TTAB,	7772	
7301	0077		77	
7302	0215		215	

7303	0212	212
7304	0240	240
7305	0017	17
7306	7766	7766
7307	0260	260
7310	7740	7740
7311	0100	0100

ADDRZA	7121
ARROW	7103
ATDIG	7171
ATYCR	7170
ATYPE	7172
ATYTB	7167
CANAL	7034
CNTRZA	7122
CNTRZB	7131
COM	0020
CON	7260
CONT	7015
DEB	7003
DECPRT	7072
DEDIT	7000
DIGIT	7130
EGAL	7035
FIN	0021
N	7036
NT	7033
OTY	7266
TBC	7277
TDIG	7245
TEMY	7276
TENPWR	7123
TTAB	7300
TYCR	7217
TYPE	7200
TYSP	7227
TYTB	7234
TY2	7205
VALUE	7127

TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>Introduction</u>	13
<u>Première Partie : Formation des étincelles dans le vide</u>	15
I - Caractéristiques des différentes décharges dans le vide	17
II - Rappel des différentes théories sur les étincelles	17
III - Conditions expérimentales pour l'obtention des étincelles	20
<u>Deuxième Partie : Etude de l'évolution du courant interélec- trode pendant le temps précédant une étincelle</u>	23
I - Etude préliminaire	25
II - Principe de la mesure	27
III - Appareillage	28
IV - Observation directe du temps précédant l'étincelle	33
V - Observation du courant amplifié pendant le temps précédant l'étincelle	36
<u>Troisième Partie : Traitement de données statistiques en temps réel par ordinateur</u>	45
A - Utilisation d'un ordinateur en temps réel pour l'étude des phénomènes précédant une étincelle.	47
I - Généralités	47
II - Appareillage permettant de transformer les signaux transmis par l'enceinte à vide en signaux traitables par ordinateur	47
III - Connection de l'appareillage au ordinateur ...	53
IV - Fonctions du ordinateur	56

	Pages
B - Résultats expérimentaux.	58
I Etude préliminaire à forte résistance de protection	59
II Résultats obtenus pour une résistance de protection de 3 mégohms	60
III Tests de Kolmogorov-Smirnov	71
IV Application des tests aux résultats obtenus avec une résistance de protection de 3 mégohms	72
<u>Conclusion</u>	79
<u>Bibliographie</u>	83
<u>Annexe</u> : Programme permettant de traiter les données statistiques correspondant aux phénomènes précédant une étincelle	87

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

L'EFFET " GUNN "

VU :

VU et APPROUVE :

Les Membres du Jury,

Le Doyen de la Faculté des Sciences

Professeur R. BERNARD

J. BRACONNIER

Professeur R. ARNAL

Professeur E. PERNOUX

VU et accordé le permis d'imprimer :

Lyon, le 17 juillet 1968

Le Recteur,
Président du Conseil de l'Université

P. LOUIS

